



POLITÉCNICA



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA
TÉCNICA AERONÁUTICA
PROYECTO FIN DE CARRERA

IMPLEMENTACIÓN DEL RECANTEO MANUAL
EN PIEZAS DE FIBRA DE CARBONO EN EL A350

ANDRÉS MARTÍNEZ MARTÍNEZ

INGENIERÍA TÉCNICA AERONÁUTICA EN AERONAVES

Noviembre 2012

Agradecimientos

A Borja Amores por haberme dedicado tanto tiempo y esfuerzo para que aprendiera y mejorara cada día sin perder ni una sola vez la paciencia.

A Santiago Pindado por ser tan flexible y estar siempre disponible en cualquier momento que lo necesitara.

A mis padres por apoyarme y animarme en todo momento y haber hecho posible económicamente que haya vivido en Madrid durante cuatro años.

A mis abuelos por ayudarme económicamente y alegrarse igual o más que yo de mis buenos momentos a lo largo de la carrera

A Carlos, Joan, César y Juan, porque sin su ayuda, el camino para completar esta carrera hubiera sido mucho más arduo y dificultoso.

Por motivos de confidencialidad con Airbus Operations S.L. y Composystem S.A. en este proyecto no se ha incluido ninguna información que pudiera violar la política de privacidad de ambas compañías.



Índice

1. Listas de contenidos	6
I. Lista de Figuras	6
II. Lista de Tablas.....	8
2. Introducción.....	12
3. Ensayos	19
3.1. Planificación de los ensayos.....	19
3.2. Medición tridimensional	22
3.3. Proceso de fabricación de plantillas.....	25
3.4. Proceso de recorte y taladrado manual de piezas.....	30
4. Fabricación de plantillas y recorte manual.....	46
4.1. Planificación de la fabricación manual.....	46
4.2. Insertos metálicos	50
4.3. Recorte y taladrado manual de piezas.....	52
5. Análisis de resultados.....	56
5.1. Implementación del proceso.....	56
6. Anexos.....	58
6.1. Anexo I: Materiales compuestos en la industria aeronáutica	58
6.2. Anexo II: Características de los materiales empleados.....	71
6.3. Anexo III: Tabla de medidas de un útil.....	76
6.4. Anexo IV: Tablas de datos.....	82
7. Bibliografía y referencias	111

1. Listas de contenidos

I. Lista de Figuras

Figura 1: Gráfica comparativa de materiales compuestos en aviones actuales.....	12
Figura 2: Airbus A350	13
Figura 3: ensamblaje del "Nose Fuselage" con el fuselaje central	15
Figura 4: Pieza en forma de L.....	16
Figura 5: Esquema del proceso de fabricación de una plantilla.....	18
Figura 6: Brazo y palpador para medición 3D.....	23
Figura 7: Distribución de las medidas en el útil.....	24
Figura 8: condiciones aceptables de trabajo en la sala limpia	26
Figura 9: Presión, t^a y vacío teóricos del ciclo de curado	29
Figura 10: Recanteo manual de una preforma.....	31
Figura 11: Aristas de referencia de posicionado de plantilla de taladrado	32
Figura 12: ensayo 1ª plantilla	35
Figura 13: ensayo 2ª plantilla	36
Figura 14: ensayo 3ª plantilla	37
Figura 15: ensayo 4ª plantilla	38
Figura 16: ensayo 5ª plantilla	39
Figura 17: ensayo 6ª plantilla	40
Figura 18: ensayo 7ª plantilla	41
Figura 19: ensayo 8ª plantilla	42
Figura 20: Casquillos introducidos en tacos de aluminio	51
Figura 21: Plantilla con insertos metálicos	52
Figura 22: corte de la preforma	53
Figura 23: Lijado de una preforma	53
Figura 24: Lijado de una pieza	54
Figura 25: Taladrado de una pieza	55
Figura 26: Evolución de las técnicas de fabricación y ensayo de aviones	58

Figura 27: Micrografías de la matriz y el refuerzo en algunos materiales compuestos	59
Figura 28: Relación esfuerzo peso para diferentes materiales	60
Figura 29: Problemas en la certificación y cualificación.....	61
Figura 30: Diferentes tipos de fibras	61
Figura 31: Dependencia de la rigidez con la orientación de la fibra	63
Figura 32: Morfología de la fibra de carbono	63
Figura 33: Composición química de las resinas termoestables epoxídicas.	65
Figura 34: Nivel de microgrietas iniciales en resinas termoestables	66
Figura 35: Materiales semielaborados.....	67
Figura 36: Diferentes tipos de fibras preimpregnadas	68
Figura 37: Diferentes tramas en tejidos de material compuesto	68
Figura 38: Incremento en la utilización de materiales compuestos en Airbus.	69
Figura 39: A380 CFRC elementos estructurales significativos.....	69
Figura 40: Evolución en la utilización de materiales para varios modelos de Airbus.....	70
Figura 41: Materiales empleados en el Boeing 787	70
Figura 42: Casquillo guía broca DIN 179.....	75

II. Lista de Tablas

Tabla 1: Planificación de ensayos	21
Tabla 2: Configuración de telas y materiales auxiliares.....	28
Tabla 3: Cuadro resumen de los ensayos	33
Tabla 4: Conclusiones del ensayo 1	34
Tabla 5: Conclusiones del ensayo 2	35
Tabla 6: conclusiones del ensayo 3.....	37
Tabla 7: conclusiones del ensayo 4.....	38
Tabla 8: conclusiones del ensayo 5.....	38
Tabla 9: conclusiones del ensayo 6	39
Tabla 10: conclusiones del ensayo 7	40
Tabla 11: conclusiones del ensayo 8.....	41
Tabla 12: Desviaciones en la posición de los taladros del primero de dos ensayos.....	43
Tabla 13: Desviaciones en la posición de los taladros del segundo de dos ensayos.....	44
Tabla 14: Desviaciones en el contorno del primero de dos ensayos.....	45
Tabla 15: Desviaciones en el contorno del segundo de dos ensayos.....	45
Tabla 16: Planificación de la fabricación manual	48
Tabla 17: Características generales del material compuesto	62
Tabla 18: Ciclo de curado, control de presión y temperatura	65
Tabla 19: Medición tridimensional de un útil de fabricación.....	76
Tabla 20: Medida 3D del contorno (pieza 1 ejecución 1 de 3)	83
Tabla 21: Medida 3D centro taladros (pieza 1 ejecución 1 de 3)	83
Tabla 22: Medida 3D del contorno (pieza 1 ejecución 2 de 3)	84
Tabla 23: Medida 3D centro taladros (pieza 1 ejecución 2 de 3)	84
Tabla 24: Medida 3D del contorno (pieza 1 ejecución 3 de 3)	85
Tabla 25: Medida 3D centro taladros (pieza 1 ejecución 3 de 3)	85
Tabla 26: Medida 3D del contorno (pieza 2 ejecución 1 de 3)	86
Tabla 27: Medida 3D centro taladros (pieza 2 ejecución 1 de 3)	86
Tabla 28: Medida 3D del contorno (pieza 2 ejecución 2 de 3)	87
Tabla 29: Medida 3D centro taladros (pieza 2 ejecución 2 de 3)	87

Tabla 30: Medida 3D del contorno (pieza 2 ejecución 3 de 3)	88
Tabla 31: Medida 3D centro taladros (pieza 2 ejecución 3 de 3)	88
Tabla 32: Medida 3D del contorno (pieza 3 ejecución 1 de 3)	89
Tabla 33: Medida 3D centro taladros (pieza 3 ejecución 1 de 3)	89
Tabla 34: Medida 3D del contorno (pieza 3 ejecución 2 de 3)	90
Tabla 35: Medida 3D centro taladros (pieza 3 ejecución 2 de 3)	90
Tabla 36: Medida 3D del contorno (pieza 3 ejecución 3 de 3)	91
Tabla 37: Medida 3D centro taladros (pieza 3 ejecución 3 de 3)	91
Tabla 38: Medida 3D del contorno (pieza 4 ejecución 1 de 3)	92
Tabla 39: Medida 3D centro taladros (pieza 4 ejecución 1 de 3)	92
Tabla 40: Medida 3D del contorno (pieza 4 ejecución 2 de 3)	93
Tabla 41: Medida 3D centro taladros (pieza 4 ejecución 2 de 3)	93
Tabla 42: Medida 3D del contorno (pieza 4 ejecución 3 de 3)	94
Tabla 43: Medida 3D centro taladros (pieza 4 ejecución 3 de 3)	94
Tabla 44: Medida 3D del contorno (pieza 5 ejecución 1 de 3)	95
Tabla 45: Medida 3D centro taladros (pieza 5 ejecución 1 de 3)	95
Tabla 46: Medida 3D del contorno (pieza 5 ejecución 2 de 3)	96
Tabla 47: Medida 3D centro taladros (pieza 5 ejecución 2 de 3)	96
Tabla 48: Medida 3D del contorno (pieza 5 ejecución 3 de 3)	97
Tabla 49: Medida 3D centro taladros (pieza 5 ejecución 3 de 3)	97
Tabla 50: Medida 3D del contorno (pieza 6 ejecución 1 de 3)	98
Tabla 51: Medida 3D centro taladros (pieza 6 ejecución 1 de 3)	98
Tabla 52: Medida 3D del contorno (pieza 6 ejecución 2 de 3)	99
Tabla 53: Medida 3D centro taladros (pieza 6 ejecución 2 de 3)	99
Tabla 54: Medida 3D del contorno (pieza 6 ejecución 3 de 3)	100
Tabla 55: Medida 3D centro taladros (pieza 6 ejecución 3 de 3)	100
Tabla 56: Medida 3D del contorno (pieza 7 ejecución 1 de 3)	101
Tabla 57: Medida 3D centro taladros (pieza 7 ejecución 1 de 3)	101
Tabla 58: Medida 3D del contorno (pieza 7 ejecución 2 de 3)	102
Tabla 59: Medida 3D centro taladros (pieza 7 ejecución 2 de 3)	102
Tabla 60: Medida 3D del contorno (pieza 7 ejecución 3 de 3)	103

Tabla 61: Medida 3D centro taladros (pieza 7 ejecución 3 de 3)	103
Tabla 62: Medida 3D del contorno (pieza 8 ejecución 1 de 3)	104
Tabla 63: Medida 3D centro taladros (pieza 8 ejecución 1 de 3)	104
Tabla 64: Medida 3D del contorno (pieza 8 ejecución 2 de 3)	105
Tabla 65: Medida 3D centro taladros (pieza 8 ejecución 2 de 3)	105
Tabla 66: Medida 3D del contorno (pieza 8 ejecución 3 de 3)	106
Tabla 67: Medida 3D centro taladros (pieza 8 ejecución 3 de 3)	106
Tabla 68: Medida 3D del contorno (pieza 9 ejecución 1 de 3)	107
Tabla 69: Medida 3D centro taladros (pieza 9 ejecución 1 de 3)	107
Tabla 70: Medida 3D del contorno (pieza 9 ejecución 2 de 3)	108
Tabla 71: Medida 3D centro taladros (pieza 8 ejecución 2 de 3)	108
Tabla 72: Medida 3D del contorno (pieza 9 ejecución 3 de 3)	108
Tabla 73: Medida 3D centro taladros (pieza 8 ejecución 3 de 3)	109

2. Introducción

El A350 XWB es el último proyecto llevado a cabo por la empresa aeronáutica europea Airbus, siendo un estandarte en tecnología de diseño y fabricación. Tanto es así que A350 es sinónimo de requerimientos muy estrictos en lo que a tolerancias se refiere. Todas las piezas que componen este avión son minuciosamente monitorizadas para que no exista ninguna desviación con respecto al diseño. Cumplir con los requerimientos exigidos conlleva a que etapas como la de mecanizado se ejecuten en su práctica totalidad de forma automatizada. Esto diferencia al A350 con respecto a otros modelos predecesores como el A380 o el A320 de la misma compañía.

Esta tecnología puntera se caracteriza en gran medida por el alto porcentaje de material compuesto que constituye tanto estructura primaria como estructura secundaria en el avión. La principal ventaja del uso de estos materiales en la industria aeronáutica es la reducción del peso, lo que se traduce en disminución del consumo, menor contaminación y sobre todo un gran aumento de la carga de pago. En la *Figura 1* se puede ver una comparativa de la cantidad de material compuesto que integra estructura primaria y secundaria en varios aviones comerciales actuales. Así mismo, en el *Anexo I* se encuentra una comparativa más detallada de la composición de materiales compuestos en diversos tipos de aeronaves.

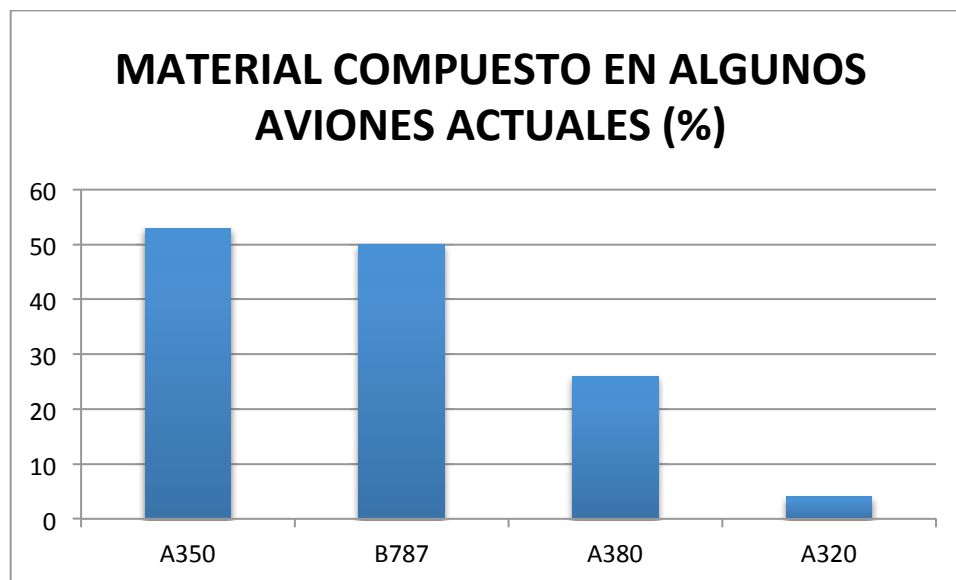


Figura 1: Gráfica comparativa de materiales compuestos en aviones actuales

El A350 XWB es un avión de dos turbinas gemelas fabricadas por Rolls-Royce, con una aerodinámica optimizada para una velocidad de crucero a Mach 0,85. Esta aeronave de última generación está especialmente diseñada para vuelos de largo alcance, teniendo una eficiencia y un consumo de combustible nunca vistos hasta el momento. Se presenta en tres modelos diferentes con dimensiones que van desde los sesenta metros de longitud de la versión más pequeña hasta los setentaicinco de la más grande. La gran eficiencia de peso de la que está provisto se debe al alto uso de material compuesto en su estructura primaria, encontrando también súper-aleaciones de aluminio y titanio.



Figura 2: Airbus A350

Tabla 1: Comparación entre A350-800 y B787-8

Versión	A350-800	B787-8
Capacidad de pasajeros	270 (3 clases)	210–250
Longitud	60,7 m	60,05 m
Envergadura	64,8 m	62,8 m
Flecha del ala	31,9°	32,2°
Altura	16,9 m	16,92 m
Ancho del fuselaje	5,96 m	5,91 m
Ancho de la cabina (de pasajeros)	5,59 m	5,49 m
Peso máximo al despegue	248,000 kg	228.000 kg
Máxima capacidad de combustible	129.000 litros	126.920 litros
Techo de servicio	13.100 m	13.000 m
Motores (2×)	Rolls-Royce Trent XWB	GE9x o Rolls-Royce Trent 1000
Empuje máximo	329 kN	284,7 kN

Composystem se encarga de la fabricación de piezas de la estructura primaria del “Nose Fuselage” o sección 11-12, compuestas todas ellas con fibra de carbono principalmente. Esta sección incluye rigidizadores, larguerillos y ángulos en su mayor parte. En la se puede ver el ensamblaje del “nose fuselage” al fuselaje central por la sección 11-12.



Figura 3: ensamblaje del "Nose Fuselage" con el fuselaje central

El proceso de fabricación de estas piezas consta de varias fases hasta su obtención definitiva, siendo en algunas un proceso manual y en otras automatizado.

La primera parte consta de varias fases, que consisten en una preparación previa del utillaje a utilizar (localización, limpieza), el laminado en *lay-up* o sala limpia y el ciclo de curado en autoclave. En la segunda parte, las piezas resultantes o preformas deben ser recanteadas para así obtener la forma definitiva y taladrar los agujeros si es preciso para su montaje en el avión. Este proceso de recanteo se hace por control numérico para poder dar las tolerancias que se requieren.

El número de piezas que se fabrican en Composystem para cada avión es de alrededor de seiscientas, teniendo unas cuatrocientas cincuenta piezas diferentes. Esto hace que el recanteo automatizado no sea del todo rentable puesto que recantar un avión completo con cuatrocientas cincuenta piezas diferentes hace que el tiempo medio de recanteo por pieza sea muy elevado. De media y suponiendo que no haya dificultades intermedias, se consiguen recantar en CNC entre ocho y diez piezas en una jornada de ocho horas, mientras que un operario de forma manual es capaz de mecanizar hasta treinta durante esa misma jornada. La forma de hacer el proceso por control numérico rentable es fabricando varios aviones a la vez con lo que se obtendrían más piezas iguales facilitando así la automatización del proceso. Sin

embargo, el *rate* actual de fabricación es un avión al mes por lo que en estos momentos sería inviable el aumento del mismo. En un futuro se pretende llegar a un *rate* de cinco o seis aviones al mes, consiguiendo hacer de esta forma rentable la fabricación automatizada. El objetivo de este proyecto es por una parte estudiar la posibilidad de desarrollar un proceso de recorte manual con el que obtener los mismos resultados que con un proceso automatizado y por otro, aumentar la capacidad actual en la etapa de mecanizado. En definitiva, lo que se busca es poder rentabilizar el proceso de recorte en la etapa actual de fabricación en Composystem hasta que la cantidad de aviones fabricados al mes sea lo suficientemente elevada para hacer rentable el control numérico.

Para lograr este aumento de capacidad es preciso adaptar el proceso de recorte automático de tal forma que mediante su homólogo manual se obtengan piezas con la misma precisión. Este proceso es complejo, pues las tolerancias en este tipo de piezas son muy estrictas.

Las piezas seleccionadas para realizar el estudio de implementación del recorte manual tienen forma de “L”, estando formadas por tres zonas: faldilla, alma y radio o zona de unión. En la Figura 4 se puede ver un modelo del tipo de piezas con las que se va a trabajar.



Figura 4: Pieza en forma de L

El tipo de utillaje que se emplea para la fabricación de estas piezas es un molde de acero, con el ángulo y superficies de la cara interna de la pieza sobre el que se laminan las capas de material compuesto y se cura posteriormente. Sobre las superficies de las faldillas y el alma está grabado con láser el contorno de la pieza y en algunos casos los centros de los taladros. Cuando

la pieza se ha curado, sobre la cara de la pieza que apoya en el útil se quedan marcados el contorno y los taladros. Sin embargo, en muchos casos el grabado de los centros de los taladros es inexistente y el contorno de la pieza puede no estar bien grabado debido a defectos en el utillaje. Este hecho no influiría si el mecanizado fuera automatizado, pues la máquina CNC no utiliza los grabados ya que está programada para mecanizar la pieza apoyándose en su computadora interna. Para el recanteo manual por el contrario, sí es preciso que el contorno de la pieza esté bien grabado porque el operario deberá guiarse a partir de ellos para proporcionar a la pieza su forma definitiva. Por este motivo, se decidió medir tridimensionalmente el utillaje para verificar que el contorno fuera correcto. Esto mismo no se pudo hacer para los taladros de las piezas seleccionadas porque no estaban grabados. Para realizar las mediciones, se utiliza una máquina tridimensional que compara por puntos el objeto medido contra su modelo en CAD. El proceso de medición reveló que los contornos coincidían con los nominales del modelo y que no era necesario regrabarlos. Después de esto, la acción que había que tomar sería grabar los centros de los taladros. Sin embargo, después de valorar el tiempo que se emplearía en el retrabajo del utillaje, no compensaba parar la fabricación porque se interrumpiría la entrega de piezas. Por esta razón este método se dejó apartado temporalmente, sin descartarlo del todo para un futuro próximo.

Obtener la posición de los agujeros en la pieza era lo más crítico para conseguir el taladrado manual y había que buscar diferentes alternativas al grabado para lograr obtenerlos. Otra posible alternativa fue utilizar plantillas de taladrado metálicas. Posicionándolas sobre las piezas se podrían usar como guías para hacer los taladros con la precisión suficiente. En este caso el proceso no influía en la fabricación de piezas pero sí dependía de que una empresa especializada las fabricara, lo que encarecería el precio. Debido a esto, las plantillas metálicas se pospusieron temporalmente, pero habían sido las precursoras de la idea que realmente se llevaría a cabo: plantillas de taladrado de material compuesto. Esta alternativa cumplía todos los requisitos que se exigían en ese momento ya que tenían la misma utilidad que las plantillas metálicas con el añadido de que se podían fabricar dentro de la propia empresa utilizando recursos propios. A partir de este punto la maquinaria se puso en marcha para comenzar con el proyecto. Primero había que planificar unos ensayos para determinar la configuración de las

plantillas y la forma de fabricarlas, después comenzarlas a usar en el recanteo de algunas familia de piezas hasta comprobar la efectividad y hacer extensible el proceso para todas las familias del paquete de piezas del A350.

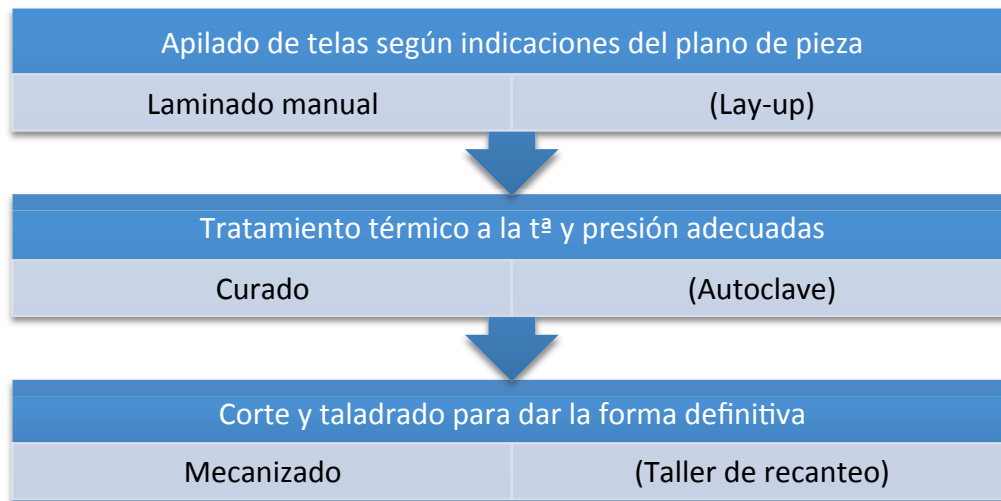


Figura 5: Esquema del proceso de fabricación de una plantilla

Para la configuración de las plantillas se probaron distintos materiales: fibra de carbono, fibra de vidrio o una mezcla de los dos. Para el proceso de fabricación se laminó directamente sobre una pieza modelo con las diferentes configuraciones de tejido y material, se curó en un autoclave y finalmente se desmoldeó y mecanizó para obtener la configuración de plantilla definitiva. Por último se reforzaron los agujeros de las plantillas para que la broca no las deteriorara antes de tiempo, para ello se emplearon unos casquillos metálicos con el fin de protegerla.

Cuando las plantillas estuvieron disponibles para ser usadas los operarios empezaron a emplearlas en el recanteo de algunas piezas hasta conseguir controlar el proceso y finalmente que se pudiera aplicar al mayor número de piezas posible.

Con estas plantillas de taladrado manual la capacidad del proceso de obtención de piezas se vería incrementada, disminuyendo drásticamente los costes de fabricación y aumentando la capacidad interna de la empresa.

3. Ensayos

Para obtener una plantilla de material compuesto es necesario determinar previamente el material del que se va a fabricar (fibra de carbono o vidrio principalmente), la configuración de telas a utilizar y el proceso de fabricación que se va a seguir. En estas decisiones influyen diversos factores como el modo de empleo, la vida útil de la plantilla y el coste de los materiales. Todo esto además, se debe hacer en un tiempo determinado en función de las exigencias de la cadena de montaje del avión, por lo que es necesario planificar todo el proceso detalladamente para que los ensayos no interfieran en la fabricación de las piezas que se vayan a entregar. A su vez, los ensayos se deben desarrollar lo más rápidamente posible para obtener resultados y poder hacer una evaluación de ellos. Con estos resultados se puede valorar si realmente merece la pena continuar con el método a implementar o hay que buscar otro método alternativo. En el apartado se detallan las diferencias entre los diferentes materiales empleados y los distintos procesos de fabricación

Los ensayos no solo sirven para determinar la configuración estructural de la plantilla sino que son indispensables para determinar su modo de uso, y especialmente su utilidad. Muchas veces una buena idea adolece de problemas en su ejecución. Mediante los ensayos se sale de dudas y se comprueba realmente si el método es ejecutable.

3.1. Planificación de los ensayos

La primera parte de la planificación pasó por convocar una reunión interna del departamento de ingeniería para asignar los recursos necesarios, hacer el cálculo del tiempo estimado de duración del proyecto, discutir sobre la problemática que se puede encontrar a lo largo del proceso, etc. Una vez que se han obtenido las conclusiones definitivas hay que exponer el proyecto a la dirección y que ésta apruebe llevar a cabo su ejecución.

La idea inicial fue planificar siete ensayos diferentes, teniéndose que ampliar a nueve por no haber llegado a una conclusión definitiva (véase la *tabla 1*). Durante las primeras ejecuciones de las plantillas se emplearon piezas modelo recanteadas a mano en las que se marcaban los taladros utilizando la máquina tridimensional para posicionarlos de forma aproximada. El porqué de utilizar en las primeras ejecuciones piezas modelo obtenidas a mano fue solo para comprobar la eficacia del método aunque no se obtuviesen piezas buenas directamente. Si se conseguía calcar la posición de los taladros aunque estos no estuvieran en su posición correcta quería decir que el método era efectivo, de esta forma no se empleaban piezas buenas en ensayos que podían no dar buenos resultados. Después de comprobar que el método podía ser válido entonces sí era necesario usar piezas buenas para afinar los resultados y tener una noción más real de lo que se pretendía obtener. Esta es la razón de la segunda tanda de ensayos, con la que se comprobó realmente el resultado definitivo y la validez del proceso. En la *Tabla 2* están recogidas las tareas realizadas en los ensayos junto con sus fechas de inicio y finalización. Las tareas 1 y 12 hacen referencia a la primera y segunda tanda de ensayos respectivamente. Cada una de estas dos está subdividida en ensayos de fabricación (2 y 13) y en ensayos de mecanizado (9 y 20). A su vez, dentro de los ensayos de fabricación (tareas de la 3 a la 9 en la primera tanda y de la 14 a la 19 en la segunda) se encuentran las subtareas de fabricación de ambas tandas de ensayos. Las tareas 10, 11, 21 y 22 son las referentes a los ensayos de mecanizado.

Tabla 2: Planificación de ensayos

Nº	Tareas	Duración	Fecha de inicio	Fecha de finalización
1	Ensayos (Primera tanda)	19 días	05/03/2012	29/03/2012
2	Ensayos de fabricación	14 días	05/03/2012	22/03/2012
3	Recanteo y taladrado manual de piezas modelo	7 días	05/03/2012	13/03/2012
4	Medición tridimensional de piezas modelo	1 día	14/03/2012	14/03/2012
5	Laminado de plantillas	2 días	15/03/2012	16/03/2012
6	Curado de plantillas	2 días	19/03/2012	20/03/2012
7	Mecanizado de plantillas	1 día	21/03/2012	21/03/2012
8	Análisis de resultados	1 día	22/03/2012	22/03/2012
9	Ensayos de mecanizado	5 días	23/03/2012	29/03/2012
10	Taladrado	4 días	23/03/2012	28/03/2012
11	Análisis de resultados	1 día	29/03/2012	29/03/2012
12	Ensayos (Segunda tanda)	14 días	09/04/2012	26/04/2012
13	Ensayos de fabricación	11 días	09/04/2012	23/04/2012
14	Recanteo y taladrado automatizado de piezas modelo	5 días	09/04/2012	13/04/2012
15	Medición tridimensional de piezas modelo	1 día	16/04/2012	16/04/2012
16	Laminado de plantillas	1 día	17/04/2012	17/04/2012
17	Curado de plantillas	2 días	18/04/2012	19/04/2012
18	Mecanizado de plantillas	1 día	20/04/2012	20/04/2012
19	Análisis de resultados	1 día	23/04/2012	23/04/2012
20	Ensayos de mecanizado	3 días	24/04/2012	26/04/2012
21	Taladrado	2 días	24/04/2012	25/04/2012
22	Análisis de resultados	1 día	26/04/2012	26/04/2012

Todo el proceso de ensayos requiere optimizar los recursos tanto de material empleado como de hora-operario para no impactar de forma negativa en el funcionamiento diario del taller. Por eso es necesario organizar todo lo relacionado con el proceso de forma que se esté continuamente trabajando en él pero sin ocupar un porcentaje alto del tiempo destinado a las tareas que están designadas a cada operario. Es indispensable repartir bien las tareas y sobre todo tener a todos los trabajadores realizando su cometido en cada momento.

El tiempo asignado a los ensayos de fabricación fue de catorce días laborables, puesto que era una parte completamente experimental y había que hacer distintas pruebas que podían no tener buenos resultados. Los ensayos consistieron en probar distintos materiales tanto primarios (los que forman la plantilla) como auxiliares (forman parte del proceso de fabricación pero no de la plantilla) para determinar su configuración. Dependiendo de cada configuración se obtienen plantillas con distinta resistencia y flexibilidad. Para la segunda tanda de ensayos, se asignaron once días para dar tiempo suficiente a que las piezas modelo fueran recanteadas por control numérico.

Los ensayos de mecanizado de piezas utilizando las plantillas eran críticos para determinar que el procedimiento era válido y continuar o no con la fabricación de las mismas para ampliar el número de piezas a implementar.

3.2. Medición tridimensional

Para fabricar las plantillas de taladrado es necesario utilizar una pieza modelo exacta, es decir, que cumpla todas las exigencias en cuanto a tolerancias geométricas y posicionales se refiere. La forma de determinar que el contorno de la pieza está dentro de la tolerancia de diseño es realizando una verificación tridimensional. Esto es posible gracias a un brazo láser que va midiendo la pieza electrónicamente.



Figura 6: Brazo y palpador para medición 3D

Para hacer la medición correctamente hay que fijar la pieza en una posición y no moverla hasta que todo el proceso de medida haya concluido, porque de lo contrario, por poco que se desplace o gire, la medida se falsea. Esto se debe a que el programa que posibilita el uso del brazo láser compara por puntos la pieza real con su correspondiente modelo CAD. Para ello es necesario referenciar la pieza al modelo del ordenador mediante puntos característicos, como son en la mayor parte de los casos los centros de los taladros.

Las tolerancias en los taladros son muy estrictas, porque a partir de ellos se mide el contorno de la pieza. Si estos taladros no están bien posicionados, el resto de elementos de la pieza tampoco son válidos. Esto implica por ejemplo, que si en una pieza se lograra obtener el contorno nominal pero los taladros hubiesen salido desviados, el proceso de medición determinaría que el contorno también está desviado. Esta forma de medir las piezas viene impuesta por el departamento de calidad de Airbus y se debe a la forma que tienen de verificarlas antes de ser montadas en el avión: utilizan uno de los taladros como referencia, metiendo un pasador en él y haciendo a la pieza coincidir con una plantilla que tiene el contorno nominal dibujado. Si el taladro de referencia está desviado, el contorno de la pieza no coincide con el de la plantilla y por tanto sería una pieza que no podría ser montada en el avión. Por este motivo, el posicionado de los taladros en las piezas es crucial para que estén en tolerancia y puedan ser entregadas a tiempo para su montaje.

Para garantizar que el recorte manual fuera posible, primero había que asegurar que los contornos de las piezas grabados en los útiles estuvieran dentro de las tolerancias exigidas. Para ello se seleccionaron los útiles de las familias de piezas a las que se les iba a aplicar el recorte manual para ser medidos tridimensionalmente. El proceso de medición del contorno de las piezas sobre los útiles es más complejo de lo que pueda parecer a simple vista, pues es necesario inicialmente hacer un escáner con una pistola que barra toda la superficie del útil para generar un sólido con la forma de éste. Después hay que dibujar sobre el sólido escaneado líneas superpuestas a las líneas del contorno de la pieza para que mediante el uso de un palpador se puedan comparar a las del útil físicamente. Con el palpador se van dando puntos a lo largo de toda la longitud de la línea y el programa a través de sucesivas iteraciones determina la desviación de cada punto de la línea respecto a la línea dibujada. En la *Figura 7* se encuentran las referencias de las líneas de contorno medidas para la verificación del útil.

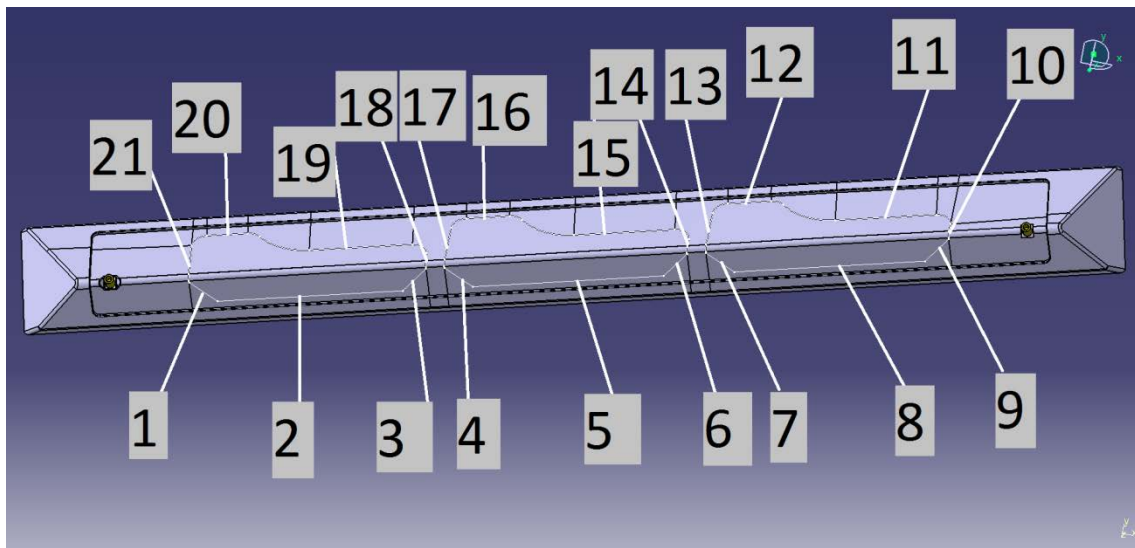


Figura 7: Distribución de las medidas en el útil

Con los valores obtenidos en estas mediciones (véase a modo de ejemplo el *Anexo III: Tabla de medidas de un útil*) la posibilidad de hacer el recorte manual se hacía factible, pues la tolerancia del útil es la mitad de la tolerancia de la pieza que fabrica. Como se pudo comprobar, esta tolerancia es de ± 0.05 milímetros, para que el error que se pueda cometer durante el proceso de fabricación no supere el ± 0.1 milímetros. Como se puede ver a lo largo de toda la tabla en el *Anexo III: Tabla de medidas de un útil*, la mayoría de los valores están dentro de

tolerancia. Las filas de longitud y rectitud respectivamente, son las que más interés tienen, pues la primera indica si cada segmento medido es más largo o más corto que su medida teórica y la segunda, muestra las desviaciones existentes entre la rectitud del segmento en el útil con una rectitud teórica. Aunque hay algunos puntos que se salen del margen de tolerancias, la desviación en ellos es pequeña y se puede asegurar que el útil es bueno. No se han adjuntado el resto de tablas de medición de útiles porque no aportan ninguna información adicional que no estuviera ya reflejada en la tabla adjunta (*Anexo III*: Tabla de medidas de un útil). A pesar de que dichas tablas no se adjunten, según los resultados obtenidos en ellas se puede asegurar que los útiles tienen los contornos de las piezas grabados dentro de la tolerancia exigida por diseño.

3.3. Proceso de fabricación de plantillas

Para fabricar las plantillas se precisa de una pieza modelo que cumpla todas las condiciones de tolerancias, para que de ella se puedan obtener plantillas de material compuesto. La manera de obtener las plantillas es copiar la forma de la pieza modelo utilizando el material seleccionado para ello, utilizando la pieza como se haría con un útil. El proceso de fabricación como tal ocurre en diferentes sitios: *lay-up* o habitación limpia, autoclave y taller de mecanizado. El *lay-up* o zona limpia es una habitación donde se realiza la construcción de las piezas estando aislada del exterior. Se controla la temperatura, la presión y la humedad para que siempre permanezca dentro de los valores establecidos. La fabricación en esta sala está prohibida cuando alguna de estas tres condiciones no se cumplen. En la *Figura 8* se puede ver un gráfico en el que se delimitan las condiciones de trabajo dentro de la sala limpia. Para el lector interesado en conocer con exactitud todos los requisitos de la sala limpia se recomienda la lectura del capítulo 6.1 de la referencia [1].

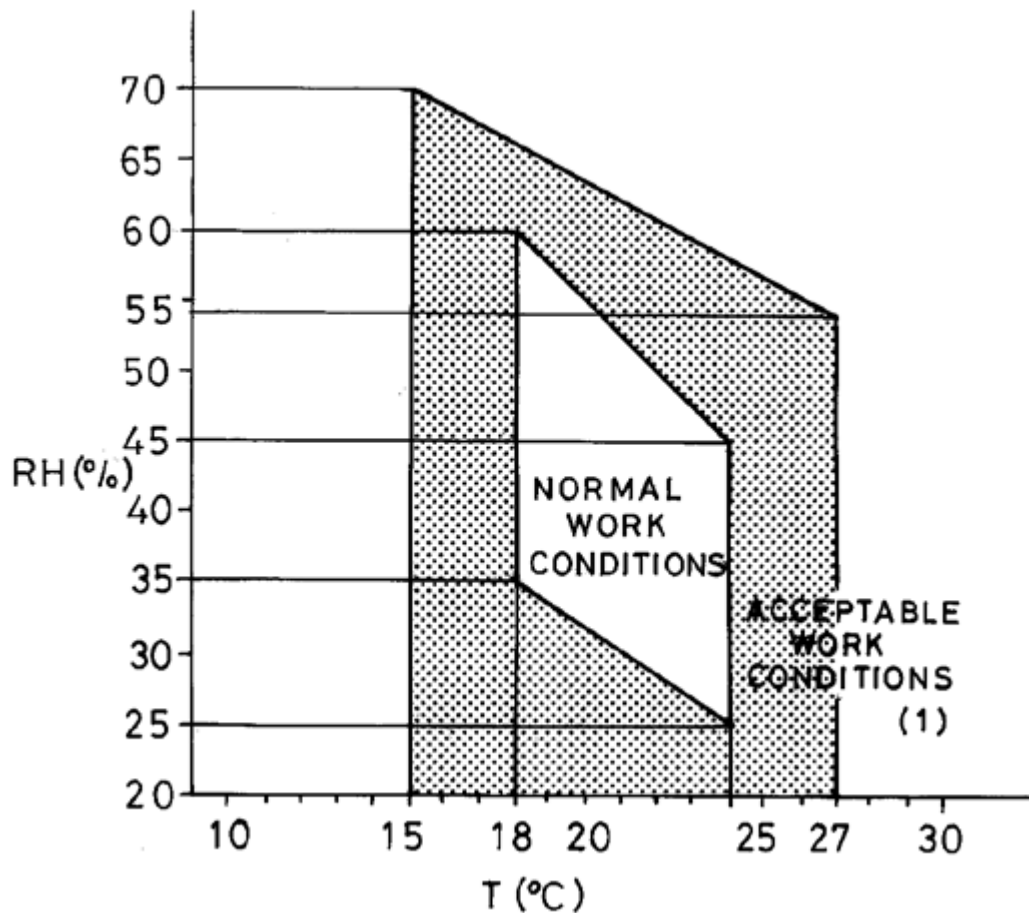


Figura 8: condiciones aceptables de trabajo en la sala limpia

El autoclave es el horno presurizado en el que se curan las piezas una vez han sido construidas en el *lay-up*. Al igual que este último, el autoclave también debe cumplir con unos requisitos mínimos de presión y temperatura por encima/debajo de los cuales no se puede desviar para conseguir el óptimo curado de las piezas. Para más información sobre los requisitos exigidos al autoclave consultar la referencia [1], capítulo 6.2 *Autoclave y hornos de curado*. El taller de mecanizado es el lugar donde se disponen las máquinas herramientas necesarias para proporcionar la forma definitiva a las piezas y también debe cumplir ciertos requisitos para que el recorte y el taladrado sean viables.

Cuando se ha obtenido una pieza modelo, ésta debe ser limpiada para poder ser llevada al *lay-up* y proceder con la construcción de la plantilla. Empleando la técnica de posicionado manual de materiales preimpregnados se construye la plantilla sobre la pieza modelo (véase Anexo 1). Una vez que el laminado manual ha concluido, la plantilla ha de curarse en el

autoclave. Antes de la realización del laminado sobre la pieza modelo hay que seleccionar el tipo de material desmoldeante que se va a utilizar para que una vez curada, la plantilla se desmolde fácilmente de la pieza modelo. Se probaron tres tipos de materiales desmoldeantes para determinar cuál era el más efectivo, el primero líquido y los otros dos sólidos.

La forma de empleo del desmoldeante líquido es aplicarlo al útil antes de hacer el posicionado del laminado. De esta forma el material no se adhiere al útil durante el ciclo de curado y es más sencillo el desmoldeo.

El segundo desmoldeante es una película de separación muy fina que se pone entre el útil y el laminado para que la resina no la traspase y se peguen útil y pieza. El desmoldeo en este caso es más sencillo porque solo es necesario quitar el film separador y la plantilla sale directamente. Su inconveniente es que para sujetar el film a la pieza o al útil es necesario utilizar algún tipo de material auxiliar como cinta adhesiva.

El tercer desmoldeante es otro tipo de film separador de mayor espesor que el anterior que además incluye una capa de adhesivo para poder ser fijado al útil directamente y posicionar el laminado encima.

Hay que preparar los materiales que se van a emplear en la fabricación de las plantillas, que están almacenados en neveras a baja temperatura. En el *Anexo II: Características de los materiales empleados* se encuentran las temperaturas de almacenaje de cada material empleado en la fabricación de las plantillas. Una vez que el material preimpregnado se ha descongelado y se han cortado los patrones hay que quitar la película de papel protectora de una de las caras del preimpregnado, realizando esta operación con extremo cuidado para no dañar el material. Las láminas del material preimpregnado se deben colocar una encima de otra haciéndolas coincidir con las direcciones que el plano indica intentando que no quede aire entre capa y capa. Durante todo el proceso de posicionado de telas se debe prestar especial atención a prevenir que no se quede ningún resto de la película separadora pegada en el material.

Para la fabricación de las plantillas hay que realizar el laminado sobre la pieza modelo de la forma explicada en el párrafo anterior con los materiales seleccionados para cada ensayo. En

la *tabla 2.3* se incluye un cuadro resumen de la configuración de materiales primarios y auxiliares empleados en cada uno de los ocho ensayos.

Tabla 3: Configuración de telas y materiales auxiliares

Ensayo	Configuración	Antiadherente
1	4 capas de tejido de fibra de vidrio tipo 1	Líquido
2	4 capas cinta de carbono	Líquido
3	8 capas de tejido de fibra de vidrio tipo 1	Film 2
4	8 capas de tejido de fibra de vidrio tipo 1	Film 1
5	8 capas de tejido de fibra de vidrio tipo 1	Film 2
7	2 tejido de fibra de vidrio tipo 2 +2 cinta carbono	Film 2
8	5 tejido de fibra de vidrio tipo 2	Film 2
9	2 tejido fibra de vidrio tipo 2 +2 tejido de fibra de carbono tipo 2	Líquido

Emplear distintos tipos de materiales y variar su cantidad de capas depende de las características finales que se deseen en las plantillas. En este caso interesa que las plantillas sean los más rígidas posibles para que al manipularlas no se estropeen pero además, interesa que sean un poco flexibles para que no se quiebren con golpes y se adapten a las piezas para realizar el taladrado.

Cuando el laminado está terminado la pieza se recubre con film transparente para evitar la contaminación con elementos externos que se puedan incrustar en las fibras o suciedad. Después la pieza se pone sobre la mesa de curado que entrará al autoclave posteriormente, apoyada en piezas más grandes para que la presión del autoclave no la descoloque o dañe el laminado. Se cubre la mesa con una bolsa para hacer vacío y compactar el laminado. El vacío se hace mediante una válvula que se conecta a un tubo que va a la bomba de vacío. Hay que comprobar que no existan fugas en la bolsa midiendo con un manómetro una depresión que no puede superar los -13.2 KPa. Además de ayudar a la compactación del material, practicar vacío

a la mesa de curado ayuda a que los vapores que se producen por la polimerización de la resina sean extraídos.

En este punto se tiene el laminado de la plantilla sobre la pieza modelo encima de la mesa de curado, cubierta con film separados y con una depresión de -13.2 KPa con lo que la plantilla ya está preparada para curarse a alta temperatura y presión en el autoclave. Después del curado, la plantilla obtendrá las propiedades mecánicas que el material le haya proporcionado y estará lista para ser mecanizada.

El curado se hace en dos fases diferentes, en las que habrá dos temperaturas permaneciendo la presión lo más constante posible y de un valor cercano a los 700 KPa. El vacío en las bolsas donde van las plantillas se sigue manteniendo constante hasta por lo menos la mitad del tiempo que dura el ciclo. Las etapas que se suceden durante todo el ciclo de curado son: calentamiento, primera estabilización, segundo calentamiento, segunda estabilización y enfriamiento. En la *¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.* puede observarse de forma gráfica la evolución de la temperatura con el tiempo (línea morada). La línea superior de color rojo es la presión interior del autoclave y la verde el vacío dentro de la bolsa de piezas.

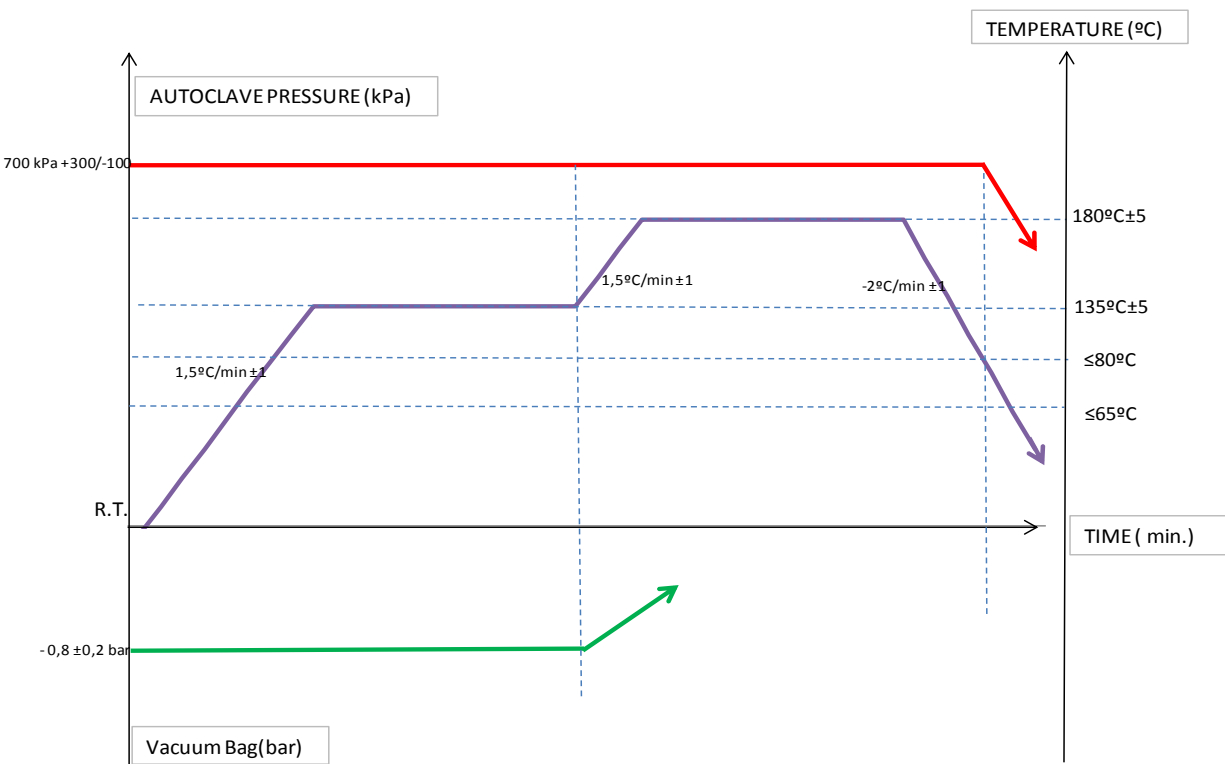


Figura 9: Presión, t° y vacío teóricos del ciclo de curado

Cuando el ciclo de curado llega a su fin, después de una duración aproximada de ocho horas hay que sacar la mesa del interior del autoclave para desmoldear la plantilla de su pieza modelo. Gracias al material desmoldeante aplicado antes del laminado, este procedimiento se facilita mucho, teniendo únicamente que quitar el film transparente que recubre la pieza y la plantilla y tirar de la parte sobresaliente de la plantilla para separarla de la pieza.

Por último hay que mecanizar la plantilla: se corta el material sobrante, se lijan las aristas vivas y se taladran los agujeros. Este último proceso es muy delicado porque como se ha dicho anteriormente, la posición de los agujeros es crucial para la obtención de la pieza definitiva. Por este motivo es imprescindible que un operario experimentado realice el taladrado. El primer paso consiste en marcar el centro del agujero copiado en la plantilla y con la broca parada hacer una muesca sobre el mismo. Después con una broca de un diámetro menor al del taladro definitivo se hace un pre-taladrado, que gracias a la muesca dejada por la broca anteriormente, sirve de guía para que no se desvíe. Una vez que el pre-taladro está terminado se cambia la broca a la del diámetro definitivo y se agranda el agujero. La referencia [2] se puede consultar para tener un conocimiento más profundo sobre el taladrado.

3.4. Proceso de recanteo y taladrado manual de piezas

El recanteo es el proceso de corte mediante el cual se obtiene la geometría de la pieza fabricada con materiales compuestos. Este proceso de corte es muy diferente al corte de los metales porque en las piezas de material compuesto existen direcciones en las que hay que aplicar fuerzas mayores debido a la dirección de las telas que las componen. Al igual que el taladrado de la plantilla, el proceso de recanteo y taladrado manual de las piezas precisa de un operario experimentado y con un gran dominio de las máquinas herramientas que se emplean para el mismo.

En primer lugar se recantea la pieza eliminando el material sobrante hasta alcanzar el trazo que hay marcado en la preforma. La preforma es la forma previa que tiene la pieza

después de haberse desmoldeado. Gracias al contorno grabado en el útil de fabricación, en la preforma se copia dicho contorno. Para obtener su geometría definitiva hay que eliminar el material sobrante mediante sierras, limadoras de rodillo, de cinta y de mano. El contorno de la pieza se va ajustando hasta conseguir su forma definitiva, inicialmente por defecto para no estropearla hasta que el operario domine el proceso. La *Figura 10* muestra el corte de una preforma apoyada sobre la bancada de la sierra de pie.



Figura 10: Recanteo manual de una preforma

Una vez que la pieza está recantada hay que posicionar la plantilla sobre ella de tal forma que los taladros estén bien referenciados al contorno. Esto se hace fijando dos puntos de referencia sobre los que se apoya la plantilla para que la posición de los agujeros quede determinada. Estos puntos de referencia son en realidad una arista del contorno y el radio de unión de las dos faldillas. En la *Figura 10* se ven los lados de referencia sobre los que se apoya la plantilla.

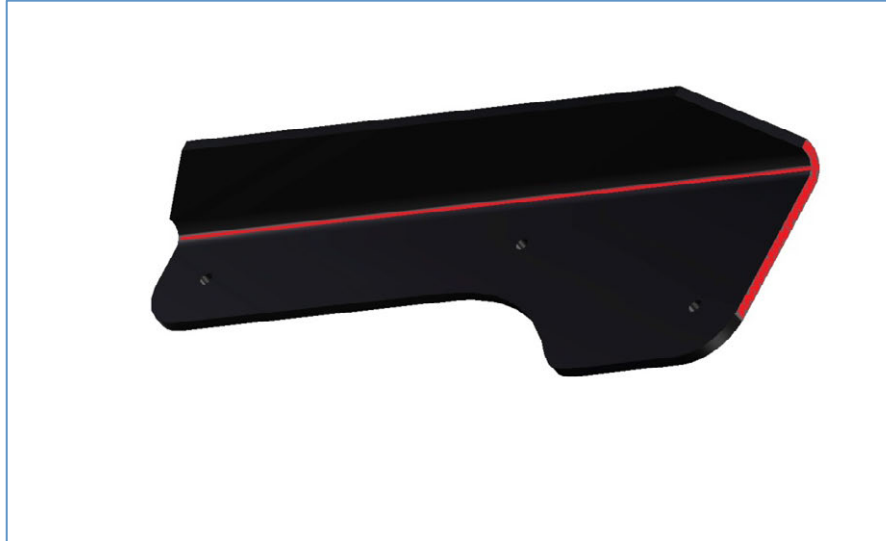


Figura 11: Aristas de referencia de posicionado de plantilla de taladrado

Cuando la plantilla se pone en la pieza según las aristas de referencia, hay que sujetarla usando un gato o sargento, y apoyándola adecuadamente se practican los agujeros empleando una taladradora vertical. El taladrado de las piezas de fibra de carbono es delicado y requiere mucha precisión. Hay que apoyar la cara inferior de la pieza sobre un taco de madera y pegar cinta de carroceros en la superior para evitar que se delamine.

El delaminado suele aparecer también cuando la broca está desgastada, por lo que es necesario afilarla o sustituirla por una nueva. Además, la velocidad de avance de la taladradora debe ser muy pequeña puesto que a alta velocidad también se producirían pequeñas delaminaciones. Cuando los agujeros están terminados se retira la plantilla y se eliminan las rebabas que hayan podido aparecer con una lija de mano. Para un conocimiento más detallado de las máquinas herramientas empleadas y la velocidad de avance de una taladradora vertical consultar la referencia [2].

Si a lo largo de todo el proceso de mecanizado de la pieza, ya sea en el recorte o en el taladrado, la fibra de vidrio se ha deteriorado debido al empleo de las herramientas sobre ella, se le aplica una capa de resina que devuelve el acabado superficial brillante. Una vez terminado este último paso, la pieza ya estaría dispuesta para ser medida tridimensionalmente y

determinar si está dentro de la tolerancia exigida y seguir su camino hasta la cadena de montaje o por el contrario, volver al taller de mecanizado para ser re-trabajada o incluso ser desechada.

Después de cada ensayo hay que analizar los resultados de la fabricación y del taladrado para evaluar todo el proceso y tratar de mejorarlo. Cuando la plantilla se desmoldea hay que hacer una inspección visual para comprobar que no hay defectos ni está dañada, hay que comprobar su rigidez y resistencia para determinar cuál va a ser su configuración definitiva y determinar si dimensionalmente está correcta. Esto último solo se puede hacer mediante el taladrado de una pieza y su posterior medición tridimensional. Esto se debe a que la plantilla es flexible y la punta del brazo de medición al apoyarse sobre la cara de la plantilla la deforma y da un valor de medida que no es real. Por eso hay que medir los resultados a través de la pieza y no directamente sobre la plantilla. En la *tabla 2.5* se puede ver un cuadro resumen de cada ejecución en la que se indica la configuración de materiales empleada, el antiadherente, el proceso de recorte de la pieza modelo empleada, el resultado de la fabricación y comentarios al respecto de cada ensayo.

Tabla 4: Cuadro resumen de los ensayos

Plantilla	Configuración	Desmoldeantes	Resultados	Recorte	Comentarios
1	4 FV tipo 1	Líquido	Incorrecto	Man.	Rotura al desmoldeo
2	4 Cinta Carbono	Líquido	Incorrecto	Man.	Muy frágil
3	8 FV tipo 1	Film 2	Correcto	Man.	Mal taladrada
4	8 FV tipo 1	Film 1	Correcto	Man.	Piezas malas
5	8 FV tipo 1	Film 2	Correcto	Man.	Piezas malas
6	2 FV t1 + 2Cinta	Film 2	Correcto	Au.	Frágil
7	5 FV tipo 2	Film 2	Correcto	Au.	Correcto
8	2 FV + 2 FC tipo2	Líquido	Correcto	Au.	Difícil desmoldeo

Análisis del ensayo 1

El primer ensayo se realizó utilizando una configuración de cuatro telas de tejido de fibra de vidrio del *tipo1*. Cada capa de vidrio se cortó con las dimensiones suficientes para cubrir toda la cara interna de la pieza y después se recortó el material sobrante para ajustarlo a la forma del contorno. Previamente se habían dado varias impregnaciones de agente desmoldeante líquido sobre la cara de la pieza para facilitar el desmoldeo de la plantilla después del curado. La pieza modelo empleada fue recantada a mano con los taladros señalados con unas marcas pintadas sobre la pieza. Esta forma de posicionar los taladros se consigue utilizando la máquina de medición tridimensional. Pasando el palpador de la máquina sobre la cara y el contorno de la pieza, el ordenador va indicando en qué posición relativa se encuentra respecto a otros puntos obtenidos por sucesivas iteraciones. Cuando el palpador está sobre el punto donde teóricamente debería estar el centro del taladro, aparece un aviso y con un rotulador se pinta el susodicho punto sobre la cara de la pieza. Este método de posicionado de taladros no es muy preciso pero el objetivo de este ensayo era comprobar que se podía reproducir la cara de la pieza sobre la fibra de vidrio de la plantilla.

Durante el desmoldeo, la plantilla se dañó. Los dos motivos principales fueron: uno, porque el antiadherente aplicado no había hecho el efecto esperado o la cantidad aplicada era insuficiente y/o dos, porque no se podía tirar de la plantilla al estar cortado el material justo al límite del contorno de la pieza.

Una vez desmoldeada la plantilla, se comprobó que era demasiado flexible y tenía poca resistencia por lo que la configuración de cuatro telas de tejido de fibra de vidrio no era factible.

Tabla 5: Conclusiones del ensayo 1

Configuración de telas		Material auxiliar		Observaciones
Flexibilidad	Resistencia	Tipo	Resultado	Difícil desmoldeo sin creces de donde tirar
Demasiado alta	Baja	Líquido	Incorrecto	

El color de la plantilla del ensayo 1 es amarillento. Esto es debido al color del material que se ha empleado en ella, en este caso, tejido de fibra de vidrio del tipo 1. La *Figura 12* muestra la imagen de la plantilla antes mencionada en la que se puede apreciar los daños que se produjeron durante el desmoldeo y la poca resistencia que a simple vista tiene.



Figura 12: ensayo 1ª plantilla

Análisis del ensayo 2

El segundo ensayo se realizó a la vez que el primero, cambiando tan solo la configuración de telas. En este caso se empleó cinta de carbono en lugar de tejido de fibra de vidrio. El agente desmoldeante también de tipo líquido y la pieza modelo recantada manualmente.

El desmoldeo fue un poco más fácil que en el primer ensayo pero todavía con dificultades. La plantilla una vez desmoldeada era muy rígida pero solo en una dirección, por lo que era muy fácil que se quebrara con el uso.

Tabla 6: Conclusiones del ensayo 2

Configuración de telas		Material auxiliar		Observaciones
Flexibilidad	Resistencia	Tipo	Resultado	Demasiada rigidez en una dirección por lo que se rompería en seguida
Muy poca	Muy poca	Líquido	Incorrecto	

En la *Figura 13* se encuentra la segunda plantilla de ensayos. Destaca el color negro intenso por el tipo de material empleado en ella: cinta de carbono.



Figura 13: ensayo 2ª plantilla

Análisis de los ensayos 3, 4 y 5

En estos tres ensayos se intentaron corregir los problemas de rigidez aumentando el número de capas de material y facilitar el desmoldeo empleando antiadherentes de tipo film. La configuración de las tres plantillas siguientes consistió en ocho capas de tejido de fibra de vidrio del tipo 1. Esta vez, el material no se recortó al contorno de la pieza para dejar un poco de creces y poder tirar de ellas en el desmoldeo. En los ensayos 3 y 5 se utilizó desmoldeante del tipo 2, es decir, film con capa adhesiva para pegarlo a la superficie de la pieza. Sobre este material la fibra de vidrio no se adhiere y el desmoldeo es muy fácil. En el ensayo 4 se probó antiadherente del tipo 1, film sin adhesivo propio. En este caso el recubrimiento de la pieza con este film es más elaborado porque se arruga con mucha facilidad y hay que utilizar cinta adhesiva para que no se mueva mientras que se hace el laminado, lo que supone demasiado tiempo de preparación. El proceso de obtención de las piezas modelo fue como en los ensayos predecesores, manual.

Después del curado, el desmoldeo de las tres plantillas fue bastante sencillo. Simplemente con tirar de las creces o material sobresaliente de la plantilla se separaban con mucha facilidad gracias al antiadherente tipo film. Las características mecánicas de las plantillas eran buenas, tenían mayor rigidez que la configuración del ensayo 1 y además seguían siendo flexibles para que no se partieran con el uso. En las Figuras 14, 15 y 16 se pueden ver los resultados del tercer, cuarto y quinto ensayo. El color vuelve a ser parecido al de la plantilla del primer ensayo porque es el mismo material pero con mayor número de capas, por eso se ve más oscuro.

Tabla 7: conclusiones del ensayo 3

Configuración de telas		Material auxiliar		Observaciones
Flexibilidad	Resistencia	Tipo	Resultado	Buenas características mecánicas pero Pieza modelo con taladros mal posicionados, no sirve para ensayos de mecanizado
Buena	Buena	Film tipo 2	Correcto	



Figura 14: ensayo 3ª plantilla

Tabla 8: conclusiones del ensayo 4

Configuración de telas		Material auxiliar		Observaciones
Flexibilidad	Resistencia	Tipo	Resultado	Buenas características mecánicas pero Pieza modelo con taladros mal posicionados, no sirve para ensayos de mecanizado
Buena	Buena	Film tipo 1	Ok	



Figura 15: ensayo 4ª plantilla

Tabla 9: conclusiones del ensayo 5

Configuración de telas		Material auxiliar		Observaciones
Flexibilidad	Resistencia	Tipo	Resultado	Pieza modelo con taladros mal posicionados, no sirve para ensayos de mecanizado
Buena	Buena	Film tipo 2	Ok	



Figura 16: ensayo 5ª plantilla

Análisis de los ensayos 6, 7 y 8

Estos tres fueron los últimos ensayos que se realizaron, diferenciándose principalmente de los otros cinco en que el recorte de las piezas modelo se hizo por control numérico, con lo que se podrían obtener resultados definitivos en ensayos de mecanizado. También se utilizaron otros materiales con distintas características para determinar cuál era el más adecuado para las plantillas definitivas.

El ensayo 6 se hizo con una mezcla de fibra de vidrio del tipo 1 y cinta de carbono. Primero se puso una capa de fibra de vidrio, luego las dos de carbono y por último otra más de vidrio. Esta configuración sin embargo, seguía siendo demasiado frágil en la dirección perpendicular a la de las fibras de carbono. El antiadherente empleado fue film tipo 2 con lo que el desmoldeo era simple.

Tabla 10: conclusiones del ensayo 6

Configuración de telas		Material auxiliar		Observaciones
Flexibilidad	Resistencia	Tipo	Resultado	Poco resistente para uso prolongado
Buena	Poca	Film tipo 2	Ok	

La fibra de vidrio puesta sobre el carbono hace que el acabado final de la superficie de la plantilla sea más brillante que si no la llevara. En la *Figura 17* se puede comprobar lo que se acaba de decir.



Figura 17: ensayo 6ª plantilla

El ensayo 7 constó de cinco capas de fibra de vidrio del tipo 2, que tiene más espesor que la del tipo 1. El antiadherente empleado volvió a ser film tipo 2. Las características mecánicas en la plantilla con este material eran incluso mejores que con las ocho telas del tejido de vidrio de tipo 1.

Tabla 11: conclusiones del ensayo 7

Configuración de telas		Material auxiliar		Observaciones
Flexibilidad	Resistencia	Tipo	Resultado	Buenas características mecánicas. Plantilla lista para ensayos de mecanizado
Buena	Muy Buena	Film tipo 2	Ok	



Figura 18: ensayo 7ª plantilla

El ensayo 8 fue de nuevo una mezcla de fibra de vidrio del tipo 2 con tejido de carbono. La disposición de las capas fue análoga a la del ensayo siete: primero una capa de vidrio, luego las dos de carbono y por último otra de vidrio. Con esta configuración las características mecánicas eran muy buenas también. El antiadherente que se usó fue el líquido, dificultándose el desmoldeo, por lo que se descartó completamente el uso de este material.

Tabla 12: conclusiones del ensayo 8

Configuración de telas		Material auxiliar		Observaciones
Flexibilidad	Resistencia	Tipo	Resultado	Mal desmoldeo, daños en la plantilla
Buena	Buena	Líquido	No ok	

La Figura 19 muestra el último de los ensayos realizados. Como se puede apreciar en dicha imagen, las creces se han roto debido al difícil desmoldeo que el agente líquido ha conseguido.



Figura 19: ensayo 8ª plantilla

Con todos los datos analizados, la conclusión fue que la configuración definitiva sería la del ensayo 7, puesto que las características mecánicas, la facilidad de desmoldeo y el ahorro de material eran las más favorables.

Los ensayos de mecanizado fueron bastante concluyentes: el proceso de recanteo y taladrado manual con plantillas de taladrado había resultado válido para la obtención de piezas. Cuando se obtuvieron las últimas tres plantillas de los ensayos éstas se emplearon para taladrar varias piezas. Las piezas fueron medidas tridimensionalmente para verificar si los resultados estaban dentro de las tolerancias exigidas. Más adelante se adjuntan dos tablas de valores dimensionales de la posición de los taladros en dos de las piezas recanteadas manualmente. Como se puede apreciar, los resultados se ajustan bastante bien dentro de las tolerancias, si bien hay algún punto que se desvía de la media. Estos puntos que estarían fuera de la tolerancia serían casos particulares asociados al error humano a lo largo del proceso. Una vez que el operario se familiarice con el proceso, este tipo de errores se minimiza.

En las *Tablas 13 y 14* en las páginas sucesivas se han recogido los valores de las desviaciones de la posición de los tres taladros que lleva una pieza seleccionada para un ensayo. El agujero B es el de referencia, por lo que se toma el valor cero para su posición en los tres ejes. El taladro C se encuentra en la prolongación del eje “Y” formando una línea recta con el anterior. Su tolerancia posicional es de una décima de milímetro, de ahí la gran importancia en

obtener una plantilla que minimice el error de posición para que el taladrado se haga de la forma más óptima posible.

Tabla 13: Desviaciones en la posición de los taladros del primero de dos ensayos

Ensayo 1	Taladros		Distancia 3D			
Agujero B	Real	Nominal	Desviación	-tol.	+tol.	Fuera tol.
Central.x	0,000mm	0,000mm	0,000mm	-	-	0,000mm
Central.y	0,000mm	0,000mm	0,000mm	-	-	0,000mm
Central.z	0,000mm	0,000mm	0,000mm	-	-	0,000mm
Distancia 3D			0,000mm	-0,200mm	0,200mm	0,000mm
Agujero C						
Central.x	96,010mm	95,994mm	0,016mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Central.y	0,000mm	0,000mm	0,000mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Central.z	-0,207mm	-0,207mm	0,000mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Distancia 3D			0,016mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Agujero 3						
Central.x	158,858mm	158,820mm	0,038mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Central.y	-23,969mm	-23,975mm	0,006mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Central.z	-0,453mm	-0,453mm	0,000mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Distancia 3D			0,038mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm

Tabla 14: Desviaciones en la posición de los taladros del segundo de dos ensayos

Ensayo 2	Taladros		Distancia 3D			
Agujero B	Real	Nominal	Desviación	-tol.	+tol.	Fuera tol.
Central.x	0,000mm	0,000mm	0,000mm	-	-	0,000mm
Central.y	0,000mm	0,000mm	0,000mm	-	-	0,000mm
Central.z	0,000mm	0,000mm	0,000mm	-	-	0,000mm
Distancia 3D			0,000mm	-0,200mm	0,200mm	0,000mm
Agujero C						
Central.x	96,011mm	95,994mm	0,017mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Central.y	0,000mm	0,000mm	0,000mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Central.z	-0,207mm	-0,207mm	0,000mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Distancia 3D			0,016mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Agujero 3						
Central.x	158,860mm	158,820mm	0,040mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Central.y	-24,019mm	-23,975mm	0,044mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Central.z	-0,453mm	-0,453mm	0,000mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Distancia 3D			0,038mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm

El contorno de la pieza se mide teniendo como referencia los taladros, por este motivo, su tolerancia es un poco más elevada (tres décimas de milímetro). Si después de la medición tridimensional, la pieza no cumple con los requisitos de tolerancias exigidos dependiendo de si el error es por defecto o por exceso, se puede volver a mecanizar para obtener el contorno adecuado. En caso de que se hubiera recantado por exceso la pieza no valdría y sería automáticamente desechada. En las *Tablas 15 y 16* se han recogido las mediciones del contorno de las dos primeras piezas recantadas a mano.

Tabla 15: Desviaciones en el contorno del primero de dos ensayos

Ensayo 1	Contorno	Distancia 3D		
	Desviación	-tol.	+tol.	Fuera tol.
Punto 1	0,007mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 2	0,111mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 3	0,231mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 4	0,312mm	-0,300mm	0,300mm	0,012mm
Punto 5	0,126mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 6	0,286mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 7	0,309mm	-0,300mm	0,300mm	0,009mm
Punto 8	0,115mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 9	0,108mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm

Tabla 16: Desviaciones en el contorno del segundo de dos ensayos

Ensayo 2	Contorno	Distancia 3D		
	Desviación	-tol.	+tol.	Fuera tol.
Punto 1	0,006mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 2	0,211mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 3	0,131mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 4	0,032mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 5	0,137mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 6	0,076mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 7	0,198mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 8	0,115mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 9	0,156mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm

En el primer ensayo hay dos puntos que están por encima del margen positivo de tolerancia, por lo que esta pieza podría ser mecanizada nuevamente y minimizar los errores

hasta conseguir que entrara dentro del margen. Si el valor obtenido hubiese sido negativo, la pieza tendría dimensiones menores a las exigidas y no habría forma de arreglarla, por lo que tendría que ser desechada.

Con la configuración definitiva y los resultados del recanteo y el taladrado manual favorables, hay que aplicar este proceso manual a la fabricación habitual de piezas.

4. Fabricación de plantillas y recanteo manual

Aplicar el proceso de recanteo y taladrado manual a la fabricación de piezas que tienen un proceso estable se debe hacer con precaución. No se debe aplicar a todas las piezas de golpe porque el proceso puede dar fallos e impedir la correcta fabricación de las mismas en el tiempo adecuado. Este proceso se debe implantar progresivamente por familias de piezas para poder controlar especialmente las primeras ejecuciones. Por este motivo es necesario seleccionar un grupo pequeño de piezas inicialmente para aplicar este procedimiento manual y hacer un seguimiento de los resultados. Conforme se vaya asegurando el proceso se puede aumentar el alcance y aplicarlo a un mayor número de piezas hasta que finalmente se lleguen a mecanizar manualmente todas las piezas del paquete.

4.1. Planificación de la fabricación manual

Al igual que en los ensayos para la selección de la configuración final de las plantillas, es imprescindible planificar en el tiempo las tareas que hay que realizar para optimizar los recursos y obtener resultados con la mayor brevedad posible, (véase la Tabla 17 de planificación). Primero hay que seleccionar las primeras familia de piezas a las que se les vaya a aplicar el mecanizado manual puesto que serán las piezas modelo para la fabricación de las plantillas. Hay que lanzar su fabricación, recantarlas por control numérico y verificarlas tridimensionalmente. Este último paso es muy importante porque las piezas modelo deben ser

piezas casi perfectas, es decir, no solo es preciso que estén dentro de las tolerancias sino que los valores de las posiciones de los taladros y el contorno sean lo más parecido al nominal para disminuir el error que se comete durante la fabricación de la plantilla. Cuando se han obtenido las piezas modelo hay que seguir el mismo proceso de fabricación que en 3.3 para la obtención de las plantillas. Finalmente hay que emplearlas en preformas para obtener las piezas definitivas. Es importante en las primeras ejecuciones con cada una de las piezas diferentes que se analicen los resultados. Cuando el proceso empieza a ser estable es el momento de implementarlo a otra familia de piezas nueva.

Tabla 17: Planificación de la fabricación manual

Nº	Tarea	Duración	Fecha inicio	Fecha fin	T. Sucesora
1	Fabricación de piezas modelo	14 días	07-may	24-may	
2	Selección	1 día	07-may	07-may	
3	Lay-up	2 días	08-may	09-may	2
4	Curado	1 día	10-may	10-may	3
5	Desmoldeo	1 día	11-may	11-may	4
6	Inspección visual	1 día	14-may	14-may	5
7	Mecanizado automático	7 días	15-may	23-may	6
8	Verificación tridimensional	1 día	24-may	24-may	7
9	Fabricación de plantillas	5 días	25-may	31-may	
10	Lay-up	1 día	25-may	25-may	8
11	Curado	1 día	28-may	28-may	10
12	Mecanizado	2 días	29-may	30-may	11
13	Inspección visual	1 día	31-may	31-may	12
14	Fabricación y mecanizado manual (1ª ejecución)	10 días	01-jun	14-jun	13
15	Lay-up	1 día	01-jun	01-jun	
16	Curado	1 día	04-jun	04-jun	15
17	Desmoldeo	1 día	05-jun	05-jun	16
18	Mecanizado manual	5 días	06-jun	12-jun	17
19	Recanteo manual	3 días	06-jun	08-jun	
20	Taladrado con plantilla	2 días	11-jun	12-jun	19
21	Verificación tridimensional	1 día	13-jun	13-jun	20
22	Análisis de resultados	1 día	14-jun	14-jun	21
23	Fabricación y mecanizado manual (2ª ejecución)	10 días	06-jun	19-jun	17
24	Lay-up	1 día	06-jun	06-jun	

25	Curado	1 día	07-jun	07-jun	24
26	Desmoldeo	1 día	08-jun	08-jun	25
27	Mecanizado manual	5 días	11-jun	15-jun	26
28	Recanteo manual	3 días	11-jun	13-jun	
29	Taladrado con plantilla	2 días	14-jun	15-jun	28
30	Verificación tridimensional	1 día	18-jun	18-jun	29
31	Análisis de resultados	1 día	19-jun	19-jun	30
Fabricación y mecanizado manual (3ª					
32	ejecución)	10 días	11-jun	22-jun	26
33	Lay-up	1 día	11-jun	11-jun	
34	Curado	1 día	12-jun	12-jun	33
35	Desmoldeo	1 día	13-jun	13-jun	34
36	Mecanizado manual	5 días	14-jun	20-jun	35
37	Recanteo manual	3 días	14-jun	18-jun	
38	Taladrado con plantilla	2 días	19-jun	20-jun	37
39	Verificación tridimensional	1 día	21-jun	21-jun	38
40	Análisis de resultados	1 día	22-jun	22-jun	39
Fabricación y mecanizado manual (3ª					
41	ejecución)	10 días	14-jun	27-jun	
42	Lay-up	1 día	14-jun	14-jun	35
43	Curado	1 día	15-jun	15-jun	42
44	Desmoldeo	1 día	18-jun	18-jun	43
45	Mecanizado manual	5 días	19-jun	25-jun	44
46	Recanteo manual	3 días	19-jun	21-jun	
47	Taladrado con plantilla	2 días	22-jun	25-jun	46
48	Verificación tridimensional	1 día	26-jun	26-jun	47
49	Análisis de resultados	1 día	27-jun	27-jun	48

En la *Tabla 17* se puede ver una planificación en el tiempo de las diferentes tareas a realizar durante el proceso de recorte y taladrado manual. Primero se eligió un conjunto de nueve piezas para implantar en ellas el nuevo proceso. De estas piezas se sacaron las primeras plantillas de taladrado con las que posteriormente se taladrarían las piezas definitivas. Para valorar de forma real los resultados de la fabricación con las plantillas es necesario realizar varias ejecuciones antes de aplicar el proceso a más piezas. Sin embargo, con la utilización de las plantillas surgió un problema importante: la broca deterioraba la fibra de vidrio agrandando los agujeros y perdiendo por lo tanto su precisión. Este hecho obligaba a buscar una solución para este problema que realmente mermaba la capacidad de fabricación con ellas.

4.2. Insertos metálicos

Después de detectar los problemas que habían aparecido con el uso prolongado de las plantillas fue necesario incluir un refuerzo para que no se estropearan con los usos. Se tuvieron que proteger los agujeros con elementos metálicos que impedían el contacto de la broca directamente con la fibra de vidrio de la plantilla. Con unos casquillos este problema se pudo evitar de forma sencilla: se introdujeron los casquillos con el diámetro del taladro en la plantilla, de forma que guiaban a la broca para el taladrado y evitaban el deterioro del material.

Para encontrar un casquillo que se adaptara a las necesidades de la plantilla se buscó uno con medidas normalizadas del catálogo DIN 179 (véase *Anexo II*). El requisito fundamental era que el diámetro interior fuera el diámetro del taladro definitivo, es decir, 3.3 mm. Por otra parte, también interesaba que la longitud del casquillo fuese la menor posible, puesto que el espesor de la plantilla es muy pequeño. Dentro del *Anexo II: Características de los materiales empleados* se puede ver el catálogo consultado en la *Figura 42*.

Para insertar los casquillos en las plantillas es necesario introducir un elemento auxiliar para que el casquillo no sobresalga y pueda salirse con el giro de la broca. Para ello se mecanizaron unos tacos de aluminio de 1.5 cm de lado y un espesor de 7 mm, (ver *Figura 20*). Los tacos se pegan con un adhesivo especial, que aguanta impactos para que no se despegue

con los golpes y que permanezca unido a la plantilla soportando las fuerzas producidas por el giro de la broca. Sobre el taco se hace un agujero de diámetro igual al diámetro exterior de casquillo para introducirlo ahí con interferencia. El taco se posiciona en la plantilla empleando un eje del diámetro del agujero para que la posición coincida perfectamente con la del agujero de la plantilla, poniendo adhesivo aeronáutico para unir los dos elementos. El adhesivo se cura a alta temperatura durante unas dos horas en una estufa para que adquiera las propiedades mecánicas para las que está destinado.

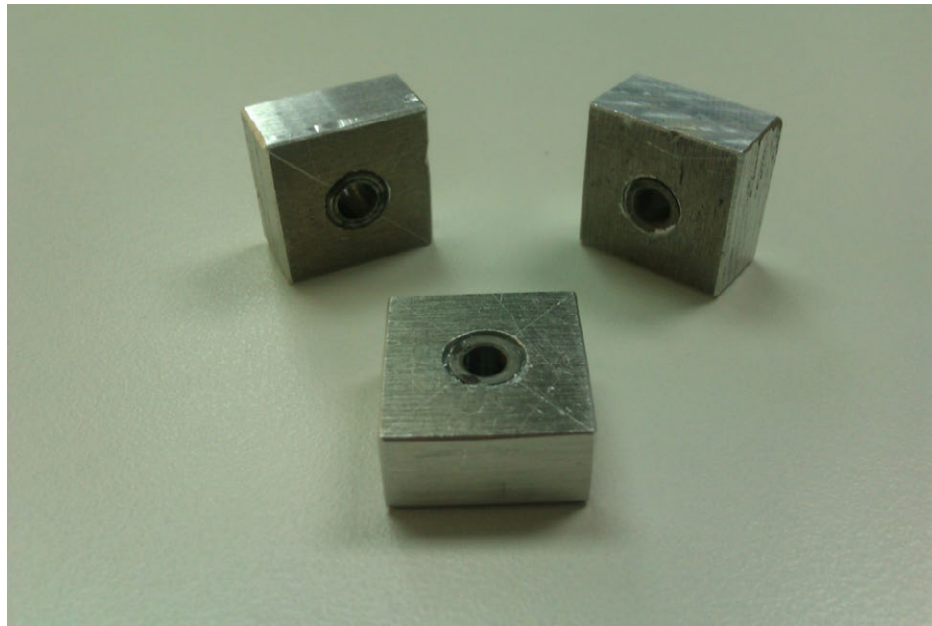


Figura 20: Casquillos introducidos en tacos de aluminio

Cuando se ha pegado el casquillo mediante el taco a la plantilla, ésta ya vuelve a estar disponible para ser utilizada en el mecanizado de piezas. De esta forma, se consigue proteger a la plantilla del desgaste que produce la broca sobre el contorno de los agujeros y se alarga la vida útil de la misma.

El resultado final de la plantilla se puede ver en la *Figura 21*: Plantilla con insertos metálicos, donde los tacos de aluminio están adheridos a la plantilla proporcionándole mayor resistencia al desgaste.

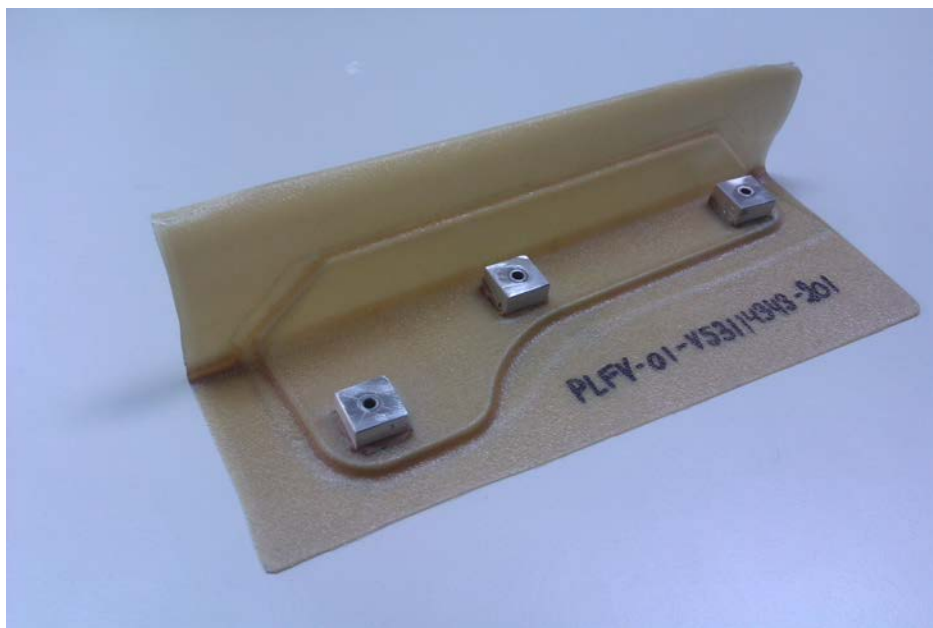


Figura 21: Plantilla con insertos metálicos

4.3. Recanteo y taladrado manual de piezas

Con las plantillas dispuestas para mecanizar piezas sin problemas de deterioros o daños, hay que fabricar piezas para que sean recanteadas y taladradas manualmente y tomar datos del proceso.

Como se puede ver en la *Tabla 17* de planificación, había dispuestas cuatro ejecuciones con las nueve piezas seleccionadas, sin embargo, debido a los problemas de deterioro de las plantillas y el tiempo invertido en preparar el refuerzo con los casquillos, esta planificación no se pudo cumplir. Después de detectar los problemas de deterioro en la primera plantilla se paró todo el proceso hasta solucionar esta incidencia. A pesar del retraso acumulado, finalmente se priorizó la fabricación de estas piezas por lo que se pudo adelantar el trabajo retrasado, y obtener resultados de tres de las cuatro ejecuciones dentro del tiempo estipulado.

El proceso de recanteo manual de las piezas se compone de varias partes:

1. Corte de la preforma: en este paso se elimina el material sobrante de la preforma para facilitar el lijado de la pieza final. En la *Figura 22*: corte de la preformase puede ver la preforma apoyada en la bancada de la sierra de pie para eliminar el material sobrante.



Figura 22: corte de la preforma

2. Limado: con este proceso se consigue eliminar material de la preforma hasta alcanzar el contorno que ésta tiene grabado. Se suelen emplear limadoras de disco como la que se muestra en la *Figura 23*: Lijado de una preforma. Con esta herramienta se consigue limar las partes rectas y las curvas exteriores.



Figura 23: Lijado de una preforma

3. Lijado: se emplea un disco de lija circular que se instala en el cabezal de la herramienta neumática que es la que proporciona la potencia para que el cabezal gire. Con ella se lijan los radios internos y en general, se mejoran los acabados del resto del contorno. En la *Figura 24*: Lijado de una pieza se ve a un operario lijando el radio interno de una pieza.



Figura 24: Lijado de una pieza

Cuando la pieza ha adquirido su geometría definitiva se introduce en la plantilla de taladrado para practicarle los agujeros como se explica en 3.4. Una vez que están bien sujetas se realiza el taladrado apoyándose en los casquillos guía de los insertos metálicos. La *Figura 25* muestra el momento en que la broca comienza a traspasar la superficie de la pieza a través del casquillo.



Figura 25: Taladrado de una pieza

En el *Anexo IV*: Tablas de datos se han recogido las medidas del contorno y de la posición de los taladros de las nueve piezas seleccionadas. De cada una de ellas hay tres ejecuciones diferentes. El análisis de los datos recopilados es muy positivo, ya que todas las piezas mecanizadas manualmente están dentro de las tolerancias exigidas exceptuando un par de puntos que sí se desvían más de lo esperado. Sin embargo, estos pocos puntos que no cumplen con los requisitos de tolerancias se podrían arreglar volviendo a mecanizar la pieza. Esto solo es posible porque la desviación es positiva y no negativa, es decir, sobra material. En caso contrario, no quedaría más remedio que desechar la pieza, aunque este no es el caso.

5. Análisis de resultados

Con los resultados de las tres ejecuciones de cada una de las nueve piezas se puede hacer una valoración bastante precisa del proceso y sacar conclusiones al respecto. Como se puede ver en Anexo IV: Tablas de datos los valores tanto del contorno de las piezas como de los taladros están dentro de las tolerancias que en la oficina de diseño se han establecido. Con los datos obtenidos se puede llegar a la conclusión de que el proceso es completamente válido y aplicable a un mayor número de piezas.

Después de analizar los datos obtenidos, los resultados de las primeras ejecuciones con las piezas seleccionadas inicialmente son perfectamente válidos y por lo tanto el objetivo de este proyecto se ha logrado. Mediante el recanteo y taladrado manual se pueden obtener piezas conforme a los requerimientos del proyecto del A350, con un coste menor que empleando un proceso de recanteo automatizado y sin disminución de calidad. Gracias a la implementación de este proceso, la capacidad interna de recanteo se verá aumentada significativamente, reduciendo las pérdidas que origina el mecanizado automatizado de tantas piezas diferentes. Llegará un punto en el que el *rate* de producción sea suficientemente alto como para rentabilizar el proceso por control numérico, pero hasta que esto ocurra, el proceso manual garantiza que se podrá seguir fabricando de acuerdo a las exigencias y con un coste inferior al que cabría esperar de cualquier otra forma.

5.1. Implementación del proceso

Maximizar el alcance del proceso es el objetivo prioritario a seguir. El estudio inicial se hace con una familia de piezas para asegurar que el proceso es válido, una vez que se ha demostrado su validez se aplica al resto de familias de piezas del paquete del A350.

En el futuro, se podrían fabricar plantillas más rígidas, de configuraciones similares a las de las piezas recanteadas, para conseguir una mayor durabilidad. Modificando la configuración de materiales y haciendo nuevos ensayos se podría llegar a optimizar la plantilla. Otra

posibilidad podría ser la fabricación de plantillas metálicas a las que no les hicieran falta los refuerzos con casquillos para los taladros. Esta fue una de las primeras ideas al inicio de este proyecto y aunque no se llevó a cabo, no se descartó por completo.

Todas estas posibilidades más las que irán surgiendo a lo largo del proyecto del A350 serán posibles puntos de mejora para optimizar el proceso de recorte manual, hasta conseguir una implantación total del proceso en la producción en serie.

6. Anexos

6.1. Anexo I: Materiales compuestos en la industria aeronáutica

Como viene referido en el capítulo 17 de la referencia [3], los materiales compuestos de matriz orgánica reforzados con fibras es una “combinación de materiales que difieren en composición o forma a escala macroscópica. Los constituyentes mantienen su identidad en el compuesto, es decir, no se disuelven o funden entre ellos aunque funcionan conjuntamente. Los componentes pueden identificarse físicamente y muestran una interfase definida entre ellos”.



Figura 26: Evolución de las técnicas de fabricación y ensayo de aviones

Generalmente, los materiales compuestos constan de una fase continua o matriz y de una fase discontinua o refuerzo, que presentan diferente composición y morfología según la funcionalidad o propiedades que se pretenden conseguir.

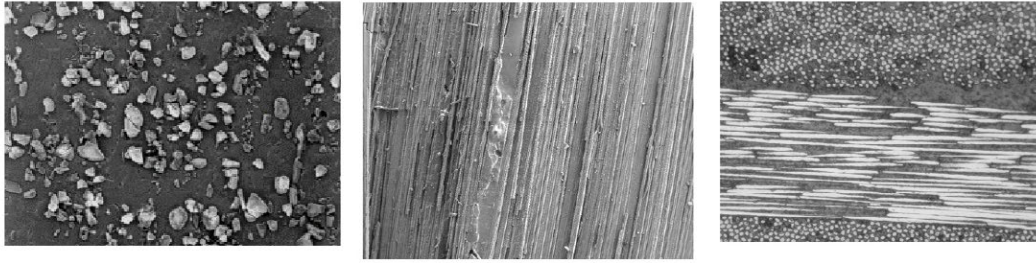


Figura 27: Micrografías de la matriz y el refuerzo en algunos materiales compuestos

El presente anexo solo trata de materiales compuestos de matriz polimérica y fibras de refuerzo continuas de utilización en la industria aeroespacial [4]. Dentro de estos, los más utilizados principalmente son materiales reforzados con fibras de carbono (CFRP). Los materiales compuestos reforzados con fibras tienen como constituyente: fibras (carbono, vidrio, aramida, SiC, boro) y matriz (poliméricas (resinas), metálicas, cerámicas). Existen de tres tipos diferentes:

- Materiales compuestos de Fibra continua
- Materiales compuestos de Fibra larga (6-80 mm)
- Materiales compuestos de Fibra corta (0.5-6 mm)

Las ventajas de los materiales compuestos reforzados con fibras son:

- Altas características mecánicas específicas.
- Diseño a medida
- Alta resistencia química
- Buen comportamiento frente al fuego
- Reducción del número de componentes /elementos de unión
- Buen comportamiento a fatiga.
- No existen problemas de corrosión.
- Gran estabilidad dimensional
- Ahorro en peso.

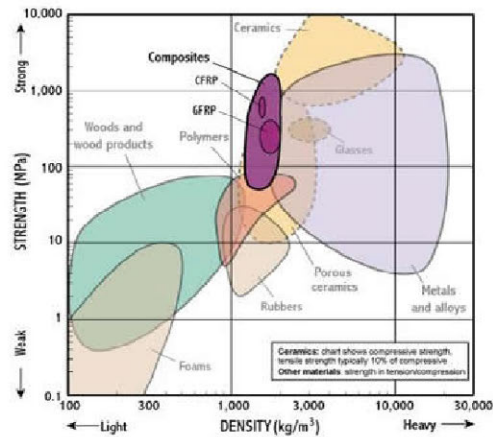


Figura 28: Relación esfuerzo peso para diferentes materiales

Pero sin embargo, presenta también algunos inconvenientes que tienen que ser tenidos en cuenta en la utilización de materiales compuestos reforzados con fibras:

- Costosos programas de evaluación, calificación y certificación de estructuras.
- Realización de costosas inversiones en instalaciones y equipos.
- Coste de los materiales elevado.
- Entrada de agua en estructuras sándwich.
- Baja resistencia a impacto
- Isotropía / anisotropía
- Protecciones adicionales frente al rayo. Baja conductividad eléctrica
- Difícil reciclado.

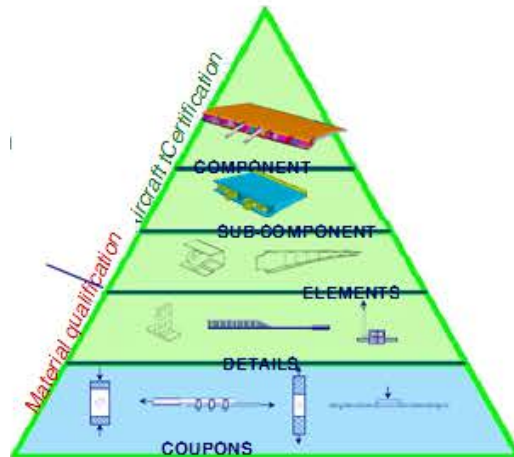


Figura 29: Problemas en la certificación y cualificación

La fibra dentro de los materiales compuestos presenta la función de proporcionar la resistencia y rigidez al material, dirigir el comportamiento mecánico de los materiales compuestos dependiendo del tipo de fibra utilizado y la orientación y por último el tratamiento superficial de la fibra el cual es fundamental para las características finales del material compuesto.

Las fibras más habituales son el carbono, vidrio, aramida (kevlar) y otras (boro, SiC, etc.)



Figura 30: Diferentes tipos de fibras

Tabla 18: Características generales del material compuesto

	VIDRIO	CARBONO	KEVLAR
PRECIO	Medio	Muy caro	Caro
RESISTENCIA ESPECIFICA	Media	Alta	Muy Alta
RIGIDEZ	Baja	Alta	Media
DENSIDAD (Comparando con el aluminio)	Similar	Más baja	Mucho más baja
APLICACIONES GENERALES	Estructuras secundarias	Estructuras primarias y secundarias	Estructuras Secundarias

Existen tres grandes clasificaciones de fibra de carbono, que son:

- Fibras de alta resistencia. Aplicación general en industria aeronáutica civil y parcialmente espacial y militar y de forma general en tejidos de refuerzo
- Fibras de módulo intermedio. Utilización en la industria aeronáutica civil y militar para aplicaciones estructurales de alta responsabilidad estructural
- Fibras de alto módulo. Aplicación en la industria espacial para aplicaciones que requieran muy alta estabilidad térmica.

Las altas características mecánicas de las fibras de carbono son debidas al alto grado de orientación de los cristales a lo largo de los ejes de las fibras. Dependiendo del proceso de fabricación se obtienen fibras de alta resistencia y alargamiento a la rotura o fibras de alto módulo (llamadas fibras de "grafito") de gran aplicación en el campo aeroespacial.

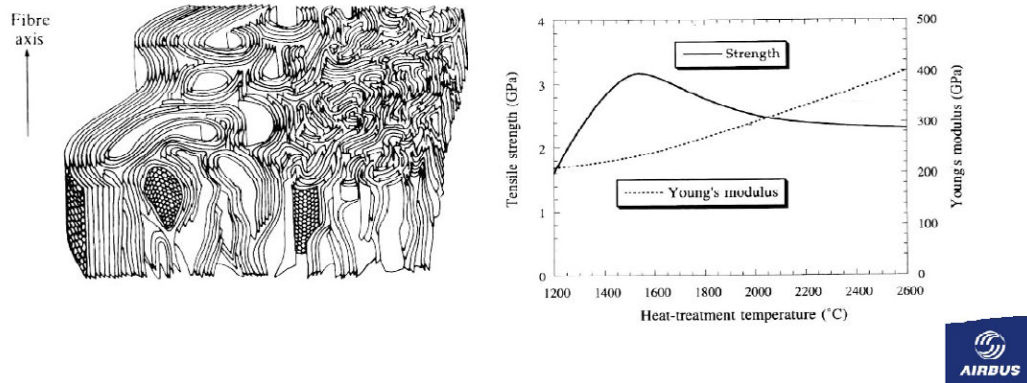


Figura 31: Dependencia de la rigidez con la orientación de la fibra

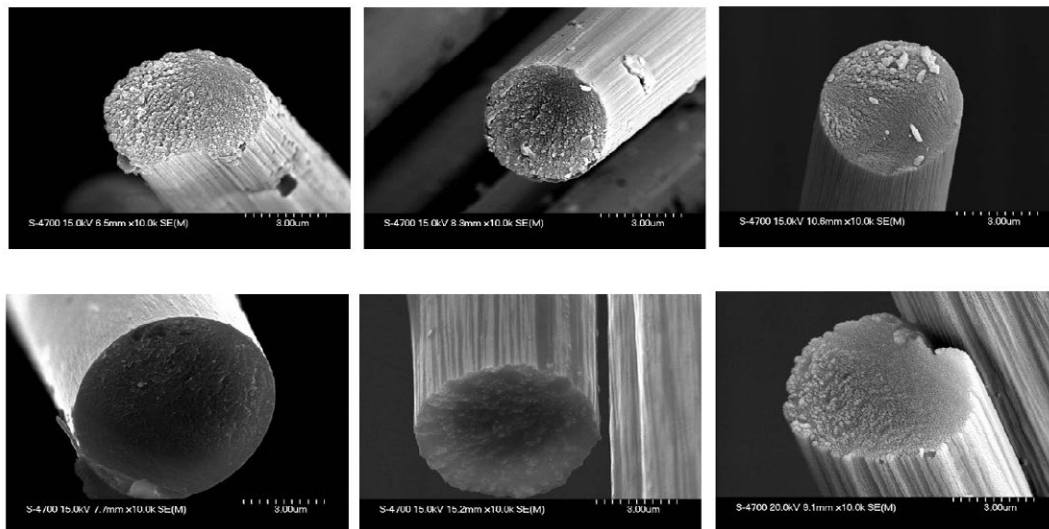


Figura 32: Morfología de la fibra de carbono

Las funciones principales de la matriz en el material compuesto son proporcionar cohesión entre las fibras; transmitir las cargas aplicadas al material compuesto; proteger a las fibras del daño mecánico y del medio ambiente; y determinar la temperatura de servicio del material compuesto y controlar la resistencia del “composite” frente al medio ambiente y agentes externos.

Existen dos grandes grupos de matrices orgánicas, las termoestables y las termoplásticas. Dentro de las primeras se engloban epoxídicas (con aditivos de tipo elastomérico o

termoplástico), BMI, PI (Termoestables o termoplásticos), poliéster, fenólicas y cyanoeter. Dentro del grupo de las termoplásticas se encuentran PEI, PEEK, PEKK y PPS.

A continuación se pretende hacer alusión a algunas de ellas, comenzando por resinas termoestables: epoxídicas:

- Son polímeros con uno o más grupos reactivos.
- Su curado se produce mediante reacción de poliadición de una resina base con un agente de curado (aminas, anhídridos, etc.).
- Las propiedades varían dependiendo de la resina base, agente de curado, de los distintos modificadores que pueden añadirse y de las condiciones de polimerización.
- Presentan baja contracción y buena adhesión a la mayoría de las fibras.
- Son bastante resistentes a disolventes, ácidos y álcalis.
- Buenas propiedades mecánicas en general, la temperatura de servicio puede variar entre 60-150°C.
- Gran versatilidad en el curado, dependiendo del tipo de catalizador y endurecedor (las más utilizadas en la fabricación con materiales compuestos son las de curado a 120°C y curado a 180°C).
- Son las más utilizadas en aplicaciones estructurales.

Generalmente consisten en una molécula intermedia que contiene al menos dos grupos reactivos epoxis.

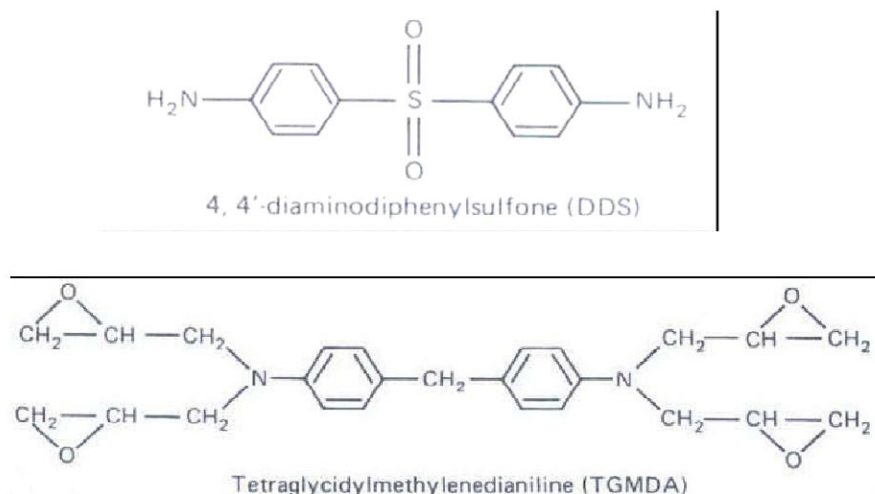


Figura 33: Composición química de las resinas termoestables epoxídicas.

Tabla 19: Ciclo de curado, control de presión y temperatura

CFRP (IM) VALORES TÍPICOS		RT/dry	70°C/ 70°C/85% r.h.
F_{tu}	<i>MPa</i>	2400	2300
F_{cu}	<i>MPa</i>	1475	1150
E_t	<i>GPa</i>	170	170
E_c	<i>GPa</i>	140	140
FOH_t	<i>MPa</i>	500	460
FOH_c	<i>MPa</i>	275	235
FFH_t	<i>MPa</i>	430	400
CAI	<i>MPa</i>	235	215

Otra resina que cabe destacar son las resinas termoestables: bismaleimidadas (BMI):

Se obtienen a partir de una polimerización de una bismaleimida aromática.

Las características generales de este tipo de resinas son:

- Buen comportamiento a altas temperaturas de servicio (intermedias entre poliamidas y resinas epoxi).
- Utilización de ciclos de curado convencionales, obteniéndose laminados de bajo contenido en huecos.
- Necesitan generalmente un postcurado para conseguir propiedades óptimas
- Buenas propiedades mecánicas en húmedo y caliente.
- Presentan microagrietamiento en exposiciones prolongadas a altas temperaturas

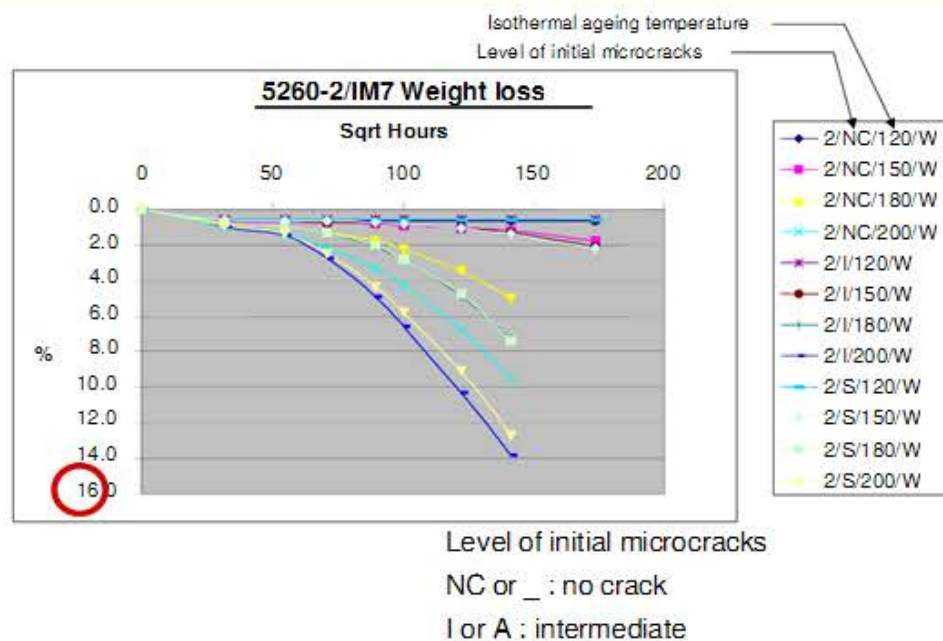


Figura 34: Nivel de microgrietas iniciales en resinas termoestables

Aunque las resinas comentadas anteriormente se enmarcan dentro del grupo de resinas termoestables, en la actualidad se está desarrollando un esfuerzo considerable para intentar sustituirlas por matrices de tipo termoplástico. Esto es debido a que presentan las siguientes ventajas:

- Materiales con tiempo de vida ilimitado
- Almacenaje a temperatura ambiente
- Mejor resistencia a impacto y humedad
- Tenacidad (deformación en rotura 30%-100%)
- Buen comportamiento FST (fire, smoke & toxicity)
- Velocidad de procesado
- Reprocesabilidad

De la misma forma, las desventajas han de ser consideradas, siendo el elevado coste de los materiales, igual que de los diferentes procesados (alta temperatura y presión), el tratamiento superficial de las fibras de carbono y la utilización de materiales auxiliares especiales.

Los materiales termoplásticos estructurales en la industria aeronáutica son procesados por inyección o mecanizado y reforzados con fibra de carbono o vidrio: PEEK, PA, PTFE. Según la cristalización se clasifican en termoplásticos amorfos (baja resistencia a fluidos agresivos, amplia ventana de procesamiento, como el PEI) y termoplásticos semicristalinos (muy buena resistencia a fluidos agresivos pese a que la ventana de procesamiento puede resultar crítica (especialmente la velocidad de enfriamiento, algunos ejemplos son: PEEK, PPS, PEKK).

Dependiendo del tipo de procesamiento posterior, existen diferentes tipos de materiales semielaborados disponibles:

- Materiales preimpregnados (lay-up manual, ATL, AFP): cintas unidireccionales y tejidos.
- Tejidos secos (RTM, RFI, RLI, VARTM, etc...): tejidos unidireccionales, convencionales (planos, sargas, satenes, etc.), non-crimp fabrics (NCF) y otros.
- Resinas líquidas (RTM, RLI, VARTM, etc.)
- Resinas en película (RFI)

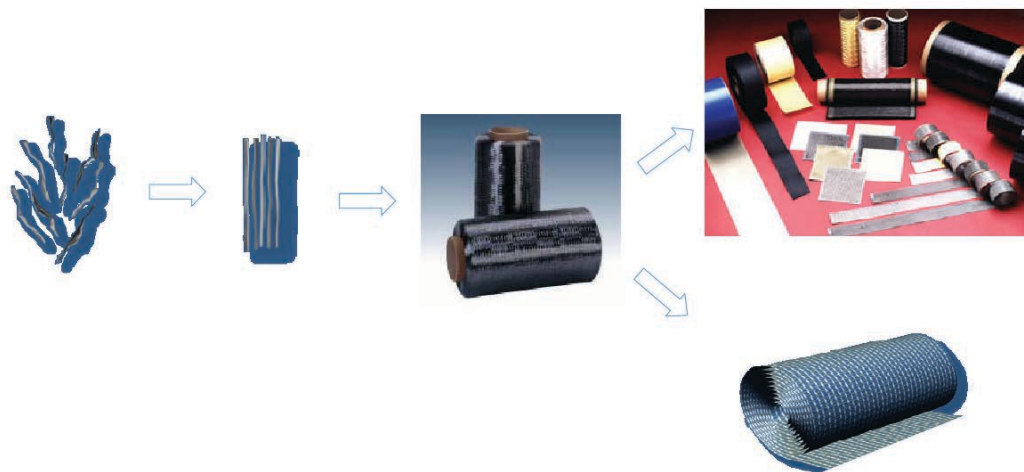


Figura 35: Materiales semielaborados

Los preimpregnados son la forma más común de presentación de los materiales compuestos utilizados en la industria aeronáutica. Los materiales preimpregnados consisten en refuerzos (cintas o tejidos) preimpregnados en una resina termoestable (en estado inicial de polimerización, estado β) ó termoplástica y capaz de procesarse en condiciones específicas. Dos

de las características principales de los materiales preimpregnados termoestables son que requieren un almacenaje a temperaturas de -18°C y que tienen tiempo de vida limitado.

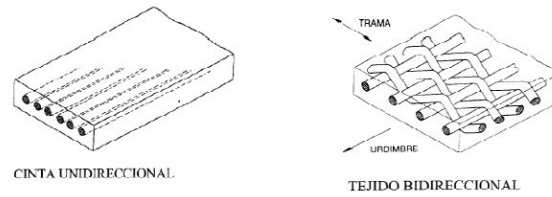


Figura 36: Diferentes tipos de fibras preimpregnadas

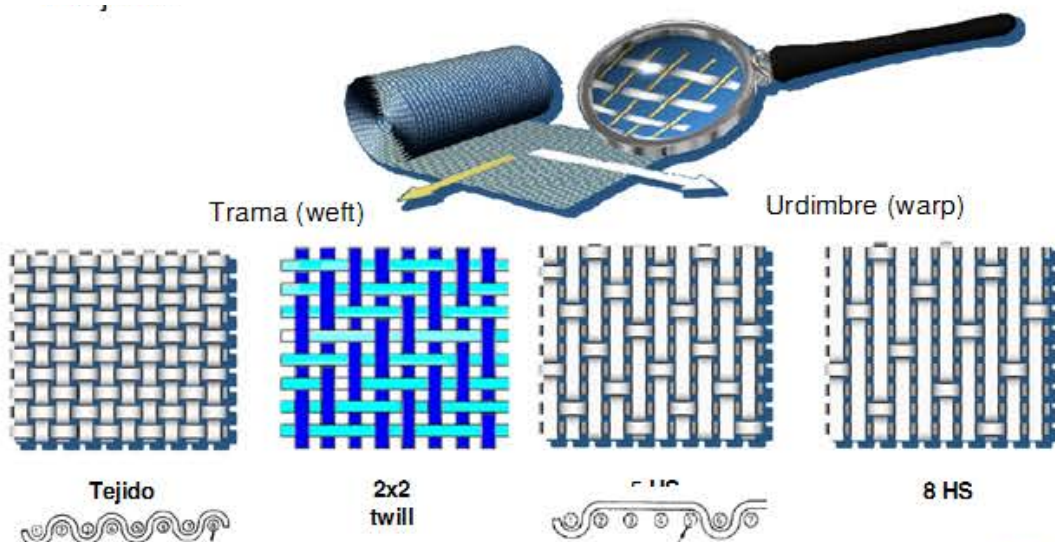


Figura 37: Diferentes tramas en tejidos de material compuesto

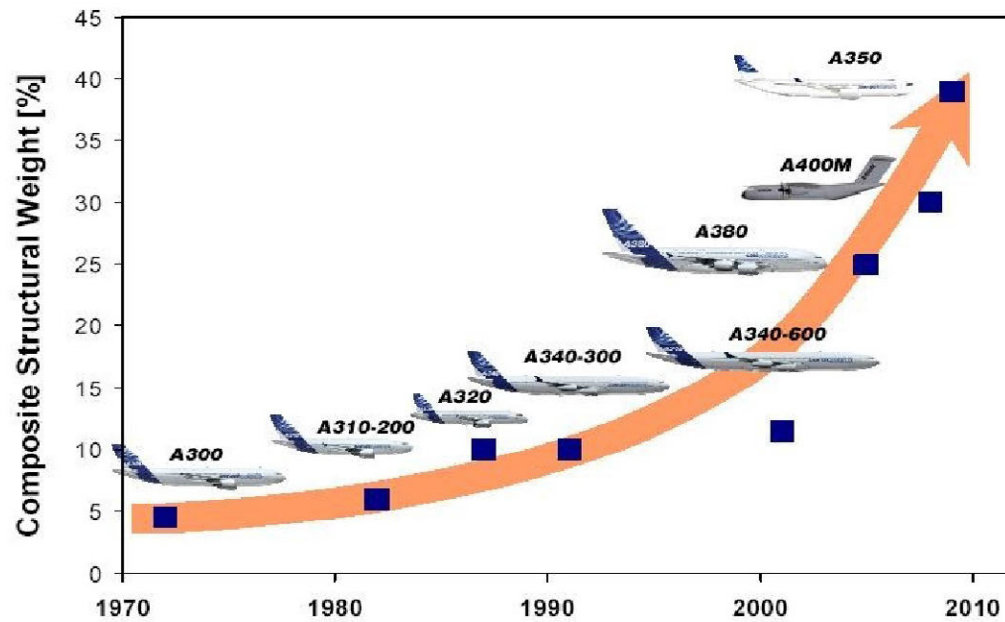


Figura 38: Incremento en la utilización de materiales compuestos en Airbus.

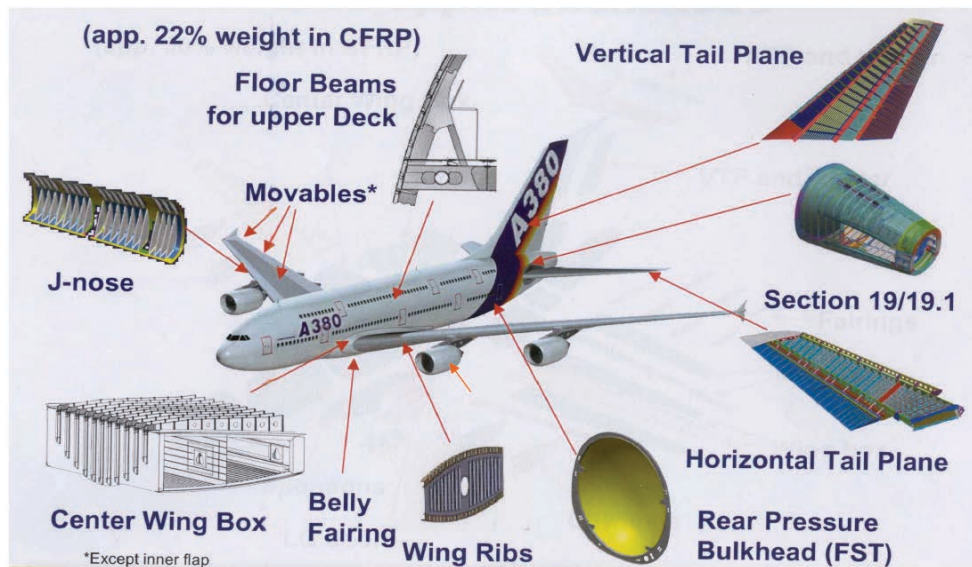


Figura 39: A380 CFRC elementos estructurales significativos

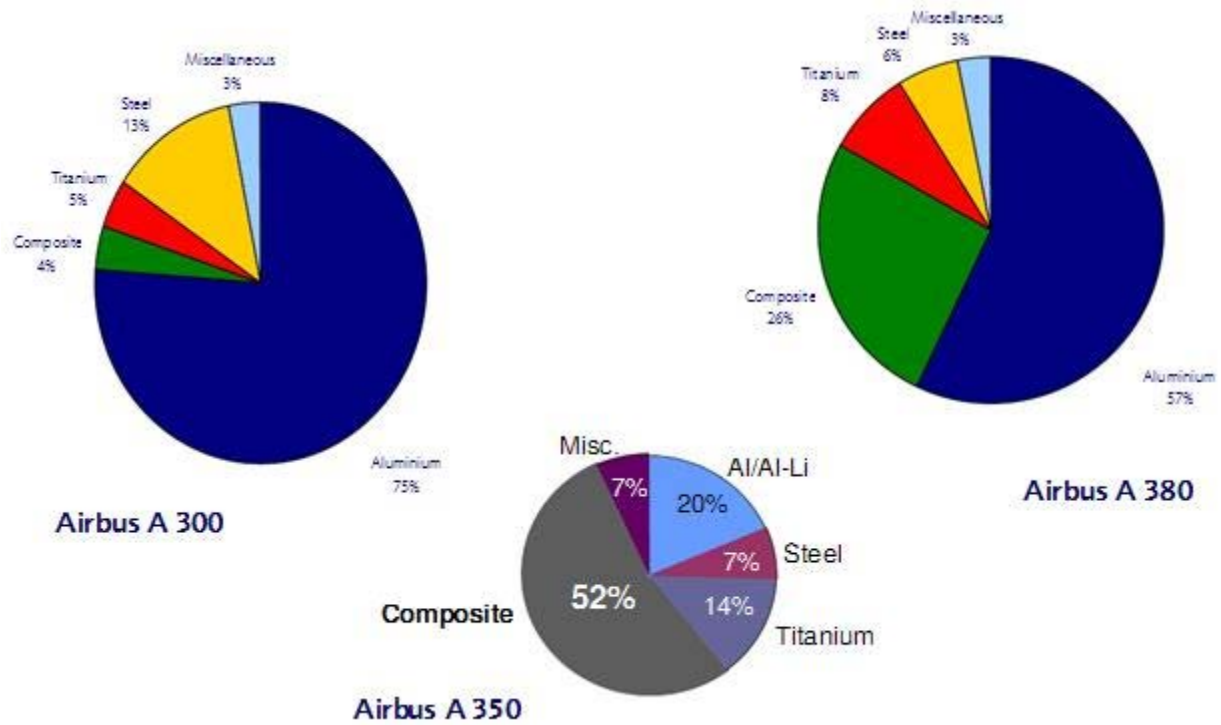


Figura 40: Evolución en la utilización de materiales para varios modelos de Airbus.

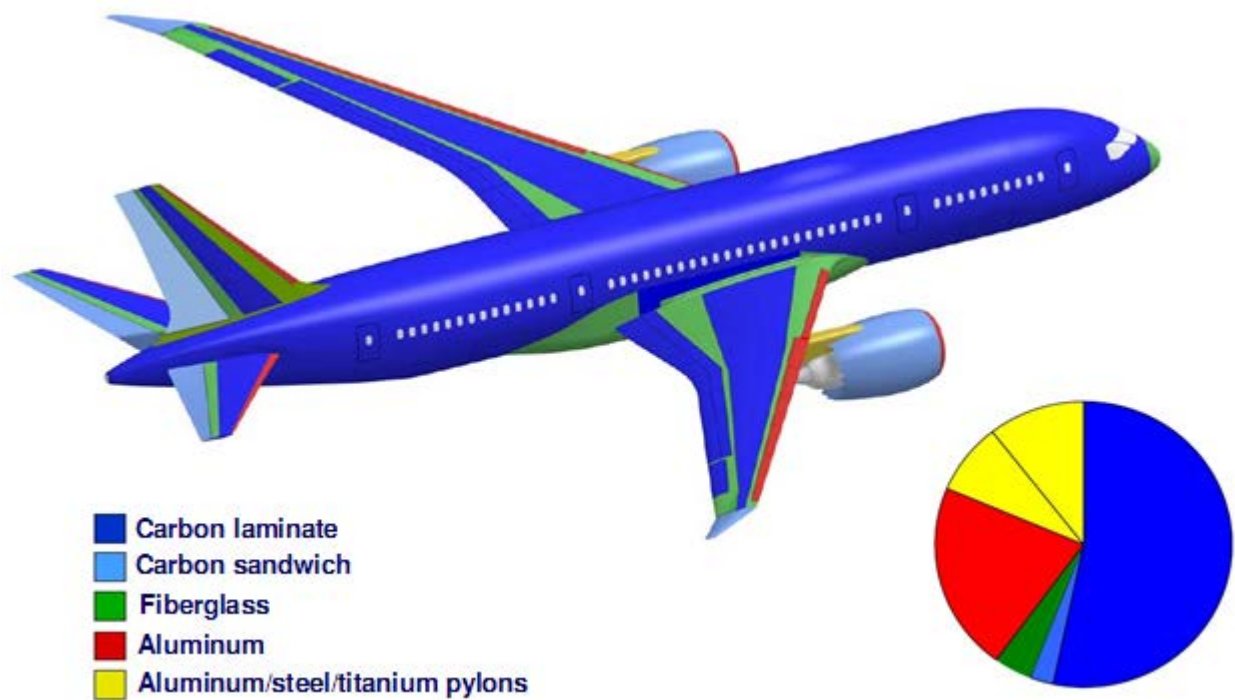


Figura 41: Materiales empleados en el Boeing 787

6.2. Anexo II: Características de los materiales empleados

VIDRIO TIPO 2

- Tejido de fibra de vidrio preimpregnado
- En resina epoxi de curado a 185°C.
- Peso superficial de la fibra: 296 ± 20 g/m².
- Peso superficial del prepreg: 470 ± 35 g/m².
- Contenido en resina: $37 \pm 3\%$
- Temperatura de curado: $185 \pm 5^\circ\text{C}$.
- Espesor por capa: 0,250 mm.
- Almacenaje: 1 año a -18°C máximo.

CARBONO TEJIDO TIPO 2

- Tejido de fibra de carbono preimpregnado en resina epoxi de curado a 180°C.
- Temperatura de servicio: -55 a 95°C.
- Textura: sarga 2x2
- Peso superficial de la fibra: 285 g/m²
- Mat.1 mat.2 mat.1 mat.2
- Peso superficial del prepreg (g/m²): 490 470
- Contenido en resina (%): 42 40
- Espesor nominal por capa (mm): 0,300
- Temperatura de curado: $180 \pm 5^\circ\text{C}$.
- Almacenaje: 1 año A -18°C MÁXIMO.

CARBONO TIPO 1

- Cinta de fibra de carbono impregnada en resina epoxi
- Temperatura de servicio: -55 a 95°C.
- Peso superficial de fibra: $194 \pm 5 \text{ g/m}^2$
- Peso superficial del prepreg: $294 \pm 15 \text{ g/m}^2$
- Contenido en resina: $34 \pm 2\%$
- Curado: 120-210 minutos a $180 \pm 5^\circ\text{C}$ ó 120-135 minutos a $185 \pm 5^\circ\text{C}$
- Propiedades físicas del laminado:
- Densidad: $1,59 \pm 0,03 \text{ g/cm}^3$
- Volumen de fibra: $59 \pm 5\%$
- Espesor nominal por capa: 0,184 mm.
- Almacenaje: 1 año a -18°C máximo.

VIDRIO TIPO 1

- Tejido de fibra de vidrio
- Preimpregnado en resina epoxi, para aplicaciones no estructurales.
- Peso superficial de fibra: $105 \pm 5 \text{ g/m}^2$
- Peso superficial del prepreg (g/m^2): 180 192
- Contenido en resina ($\pm 3\%$): 42 45
- Temperatura de curado: $185 \pm 5^\circ\text{C}$.
- Espesor por capa (curado, mm): 0,100- 0,110
- Almacenaje: 1 año a -18°C máximo.

DESMOLDEANTE FILM TIPO 2

- Desmoldeante en película, auto-adhesivo
- Formado por una película de ptfe y adhesivo de silicona
- De uso en el curado de materiales compuestos y adhesivos.
- No utilizar en el co-curado de estructuras sandwich.

- Utilizar a temperatura ambiente con el material termoestable sin polimerizar, y en autoclave cuando no se vaya a realizar un encolado posterior.
- Espesor nominal: 0,13 mm (.005").
- Almacenaje: ilimitado, a 5-28°C, 40-60% h.r. Y sin exposición a la luz ultravioleta.
- Se suministra en rollos de 36" (914 mm) de ancho

DEMOLDEANTE LÍQUIDO

- Desmoldeante líquido, de uso en el curado de piezas de materiales compuestos y adhesivos.
- Se utiliza principalmente en piezas de geometría compleja y cuando se requiera un acabado superficial fino y brillante.
- Almacenaje: 1 año a 5-28°C.

DESMOLDEANTE FILM TIPO 1

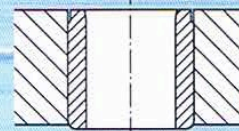
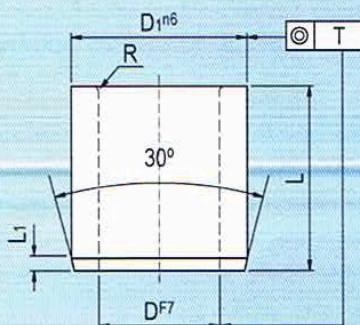
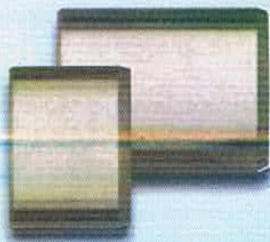
- Película de etileno-tetrafluoretileno (etfe),
- Utilizada como material separador en la fabricación
- Bolsas de vacío para ciclos de curado en autoclave
- Temperatura máxima de servicio: 230°C.
- Color: rojo
- Espesor: 0.025 mm
- Almacenaje: ilimitado, en sus envolturas originales, 5-28°C, 40-60% h.r. Y sin exposición a la luz solar directa.

ADHESIVO AERONÁUTICO

- Espesor nominal:
- Adhesivo "film" epoxi con soporte en "mat" de poliéster para reparaciones
- Temperatura de servicio: -55 a 60°C
- Peso superficial: 300 ± 25 g/m²

- Espesor nominal: 0,250 mm
- Curado: 4 horas a $90\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ ó 90 minutos a $125\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Almacenaje: 1 año a $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ desde la fecha de envío

Casquillo guía broca liso



CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS:

Material.....: Acero de cementación y temple

Tratamiento..: Cementado y templado

Dureza: 60-62 HRC

Acabado: Rectificado en sus diámetros

Tolerancias .: F7 para D (diámetro interior); n6 para D1 (diámetro exterior)

Diámetro interior D	D1	L		L1	R	T
		Corto	Largo			
2,0-2,6	5	6	9	1	1	0,01
2,7-3,3	6	8	12	1	1	0,01
3,4-4,0	7	8	12	1	1	0,01
4,1-5,0	8	8	12	1	1	0,01
5,1-6,0	10	10	16	1,5	1,25	0,02
6,1-8,0	12	10	16	1,5	1,25	0,02
8,1-10	15	12	20	2	1,5	0,02
10,1-12	18	12	20	2	1,5	0,02
12,1-15	22	16	28	2	1,5	0,02
15,25-18	26	16	28	2	1,5	0,02
18,25-22	30	20	36	3	2,5	0,02
22,25-26	35	20	36	3	2,5	0,02
26,25-30	42	25	45	3	2,5	0,02
30,25-35	48	25	45	3	2,5	0,04
35,5-42	55	30	56	3,5	3	0,04
42,5-48	62	30	56	3,5	3	0,04
48,5-55	70	30	56	3,5	3	0,04
56-62	78	35	72	3,5	3	0,04

Figura 42: Casquillo guía broca DIN 179

6.3. Anexo III: Tabla de medidas de un útil

Tabla 20: Medición tridimensional de un útil de fabricación

Línea 1						
	Real	Nominal	Desv	- tol.	+tol.	FueraTol.
Longitud	23,684mm	23,680mm	-0,004mm	-0,050mm	0,050mm	0,000mm
Error mín.	-0,005mm		-0,005mm	-0,050mm	0,050mm	0,000mm
Error máx.	0,006mm		0,006mm	-0,050mm	0,050mm	0,000mm
Rectitud	0,011mm		0,011mm	-0,050mm	0,050mm	0,000mm
Línea 2						
	Real	Nominal	Desv	- tol.	+tol.	FueraTol.
Longitud	138,749mm	138,721mm	-0,028mm	-0,050mm	0,050mm	0,000mm
Error mín.	-0,079mm		-0,079mm	-0,050mm	0,050mm	-0,029mm
Error máx.	0,034mm		0,034mm	-0,050mm	0,050mm	0,000mm
Rectitud	0,113mm		0,113mm	-0,050mm	0,050mm	0,063mm
Línea 3						
	Real	Nominal	Desv	- tol.	+tol.	FueraTol.
Longitud	24,545mm	24,550mm	0,005mm	-0,050mm	0,050mm	0,000mm
Error mín.	-0,001mm		-0,001mm	-0,050mm	0,050mm	0,000mm
Error máx.	0,001mm		0,001mm	-0,050mm	0,050mm	0,000mm
Rectitud	0,002mm		0,002mm	-0,050mm	0,050mm	0,000mm
Línea 4						
	Real	Nominal	Desv	- tol.	+tol.	FueraTol.
Longitud	24,719mm	24,721mm	0,002mm	-0,050mm	0,050mm	0,000mm
Error mín.	-0,005mm		-0,005mm	-0,050mm	0,050mm	0,000mm
Error máx.	0,004mm		0,004mm	-0,050mm	0,050mm	0,000mm
Rectitud	0,009mm		0,009mm	-0,050mm	0,050mm	0,000mm

Línea 5						
	Real	Nominal	Desv	- tol.	+tol.	FueraTol.
Longitud	149,923mm	149,927	-4,839mm	-0,050mm	0,050mm	0,000mm
Error mín.	-0,101mm		-0,101mm	-0,050mm	0,050mm	-0,051mm
Error máx.	0,072mm		0,072mm	-0,050mm	0,050mm	0,022mm
Rectitud	0,173mm		0,173mm	-0,050mm	0,050mm	0,123mm
Línea 6						
	Real	Nominal	Desv	- tol.	+tol.	FueraTol.
Longitud	25,063mm	154,762mm	0,004mm	-0,050mm	0,050mm	0,000mm
Error mín.	-0,006mm		-0,006mm	-0,050mm	0,050mm	0,000mm
Error máx.	0,004mm		0,004mm	-0,050mm	0,050mm	0,000mm
Rectitud	0,010mm		0,010mm	-0,050mm	0,050mm	0,000mm
Línea 7						
	Real	Nominal	Desv	- tol.	+tol.	FueraTol.
Longitud	24,531mm	24,540	0,009mm	-0,050mm	0,050mm	0,000mm
Error mín.	-0,004mm		-0,004mm	-0,050mm	0,050mm	0,000mm
Error máx.	0,003mm		0,003mm	-0,050mm	0,050mm	0,000mm
Rectitud	0,007mm		0,007mm	-0,050mm	0,050mm	0,000mm
Línea 8						
	Real	Nominal	Desv	- tol.	+tol.	FueraTol.
Longitud	150,021mm	150,019	-0,002mm	-0,050mm	0,050mm	0,000mm
Error mín.	-0,096mm		-0,096mm	-0,050mm	0,050mm	-0,046mm
Error máx.	0,075mm		0,075mm	-0,050mm	0,050mm	0,025mm
Rectitud	0,172mm		0,172mm	-0,050mm	0,050mm	0,122mm

Línea 9						
	Real	Nominal	Desv	- tol.	+tol.	FueraTol.
Longitud	25,008mm	25,015mm	0,007mm	-0,050mm	0,050mm	0,000mm
Error mín.	-0,002mm		-0,096mm	-0,050mm	0,050mm	0,000mm
Error máx.	0,003mm		0,075mm	-0,050mm	0,050mm	0,000mm
Rectitud	0,005mm		0,172mm	-0,050mm	0,050mm	0,000mm
Línea 10						
	Real	Nominal	Desv	- tol.	+tol.	FueraTol.
Longitud	8,136mm	8,145mm	0,009mm	-0,050mm	0,050mm	0,000mm
Error mín.	-0,007mm		-0,007mm	-0,050mm	0,050mm	0,000mm
Error máx.	0,010mm		0,010mm	-0,050mm	0,050mm	0,000mm
Rectitud	0,017mm		0,017mm	-0,050mm	0,050mm	0,000mm
Línea 11						
	Real	Nominal	Desv	- tol.	+tol.	FueraTol.
Longitud	79,408mm	79,419mm	0,011mm	-0,050mm	0,050mm	0,000mm
Error mín.	-0,006mm		-0,006mm	-0,050mm	0,050mm	0,000mm
Error máx.	0,005mm		0,005mm	-0,050mm	0,050mm	0,000mm
Rectitud	0,012mm		0,012mm	-0,050mm	0,050mm	0,000mm
Línea 12						
	Real	Nominal	Desv	- tol.	+tol.	FueraTol.
Longitud	32,396mm	32,406mm	0,010mm	-0,050mm	0,050mm	0,000mm
Error mín.	-0,008mm		-0,008mm	-0,050mm	0,050mm	0,000mm
Error máx.	0,011mm		0,011mm	-0,050mm	0,050mm	0,000mm
Rectitud	0,019mm		0,019mm	-0,050mm	0,050mm	0,000mm

Línea 13						
	Real	Nominal	Desv	- tol.	+tol.	FueraTol.
Longitud	37,194mm	37,204mm	0,010mm	-0,050mm	0,050mm	0,000mm
Error mín.	-0,090mm		-0,008mm	-0,050mm	0,050mm	0,000mm
Error máx.	0,076mm		0,011mm	-0,050mm	0,050mm	0,000mm
Rectitud	0,166mm		0,019mm	-0,050mm	0,050mm	0,000mm
Línea 14						
	Real	Nominal	Desv	- tol.	+tol.	FueraTol.
Longitud	7,576mm	7,585mm	0,009mm	-0,050mm	0,050mm	0,000mm
Error mín.	-0,001mm		-0,001mm	-0,050mm	0,050mm	0,000mm
Error máx.	0,002mm		0,002mm	-0,050mm	0,050mm	0,000mm
Rectitud	0,003mm		0,003mm	-0,050mm	0,050mm	0,000mm
Línea 15						
	Real	Nominal	Desv	- tol.	+tol.	FueraTol.
Longitud	80,148mm	80,159mm	0,011mm	-0,050mm	0,050mm	0,000mm
Error mín.	-0,008mm		-0,008mm	-0,050mm	0,050mm	0,000mm
Error máx.	0,009mm		0,009mm	-0,050mm	0,050mm	0,000mm
Rectitud	0,017mm		0,017mm	-0,050mm	0,050mm	0,000mm
Línea 16						
	Real	Nominal	Desv	- tol.	+tol.	FueraTol.
Longitud	33,001mm	32,989mm	-0,012mm	-0,050mm	0,050mm	0,000mm
Error mín.	-0,012mm		-0,012mm	-0,050mm	0,050mm	0,000mm
Error máx.	0,013mm		0,013mm	-0,050mm	0,050mm	0,000mm
Rectitud	0,025mm		0,025mm	-0,050mm	0,050mm	0,000mm

Línea 17						
	Real	Nominal	Desv	- tol.	+tol.	FueraTol.
Longitud	8,067mm	8,073mm	0,006mm	-0,050mm	0,050mm	0,000mm
Error mín.	-0,048mm		-0,048mm	-0,050mm	0,050mm	0,000mm
Error máx.	0,066mm		0,066mm	-0,050mm	0,050mm	0,016mm
Rectitud	0,115mm		0,115mm	-0,050mm	0,050mm	0,065mm
Línea 18						
	Real	Nominal	Desv	- tol.	+tol.	FueraTol.
Longitud	81,780mm	81,721mm	-0,059mm	-0,050mm	0,050mm	-0,009mm
Error mín.	-0,026mm		-0,026mm	-0,050mm	0,050mm	0,000mm
Error máx.	0,105mm		0,105mm	-0,050mm	0,050mm	0,055mm
Rectitud	0,131mm		0,131mm	-0,050mm	0,050mm	0,081mm

Línea 19						
	Real	Nominal	Desv	- tol.	+tol.	FueraTol.
Longitud	27,735mm	27,715mm	-0,02mm	-0,050mm	0,050mm	0,000mm
Error mín.	-0,009mm		-0,009mm	-0,050mm	0,050mm	0,000mm
Error máx.	0,009mm		0,009mm	-0,050mm	0,050mm	0,000mm
Rectitud	0,018mm		0,018mm	-0,050mm	0,050mm	0,000mm
Línea 20						
	Real	Nominal	Desv	- tol.	+tol.	FueraTol.
Longitud	30,296mm	30,303mm	0,007mm	-0,050mm	0,050mm	0,000mm
Error mín.	-0,030mm		-0,030mm	-0,050mm	0,050mm	0,000mm
Error máx.	0,029mm		0,029mm	-0,050mm	0,050mm	0,000mm
Rectitud	0,059mm		0,059mm	-0,050mm	0,050mm	0,009mm
Línea 21						
	Real	Nominal	Desv	- tol.	+tol.	FueraTol.
Longitud	17,369mm	17,401mm	0,032mm	-0,050mm	0,050mm	0,000mm
Error mín.	-0,012mm		-0,012mm	-0,050mm	0,050mm	0,000mm
Error máx.	0,011mm		0,011mm	-0,050mm	0,050mm	0,000mm
Rectitud	0,023mm		0,023mm	-0,050mm	0,050mm	0,000mm

6.4. Anexo IV: Tablas de datos

En este anexo se adjuntan las tres medidas de los taladros y del contorno de cada una de las nueve primeras piezas obtenidas con el método de recanteo y taladrado manual. En la tabla de contorno se han medido 9 puntos aleatoriamente del mismo y se han registrado sus valores y las diferencias con la medida nominal. En la tabla de los taladros se mide su posición en los tres ejes x , y , z estableciendo el origen en el agujero B. Las diferencias con la posición nominal también están calculadas. La fila de distancia 3D no aporta ninguna información útil, sin embargo es parte del proceso de iteración del software controlador del brazo de medición tridimensional.

Las tolerancias que se exigen para este tipo de piezas son muy estrictas. Difieren en función del elemento al que vayan referidas, es decir, hay algunas partes de la pieza con tolerancias más estrictas que otras. Los taladros son los elementos que más controlados están. El taladro B es el de referencia. A este taladro no se le aplica tolerancia posicional porque se toma su posición como cero en los tres ejes, es decir, es el origen del sistema de medida de la pieza. El taladro C es el taladro central, y su tolerancia posicional es de 0.1mm. El taladro A es el del extremo opuesto al B, y su tolerancia posicional es de 0.3mm. Como se puede deducir, cuanto mayor es la distancia al origen del sistema de medida mayor es la tolerancia en posición de los taladros. En cuanto al contorno de la pieza, la tolerancia geométrica es de 0.3mm, manteniendo el origen en el taladro B.

El orden de las tablas se ha establecido de la siguiente manera:
De cada pieza (de la 1 a la 9) se ha adjuntado en primer lugar la tabla de puntos sobre el contorno y en segundo lugar la tabla de posición de los taladros de la primera ejecución. A continuación y en el mismo orden siguen las tablas de contorno y taladros de las ejecuciones segunda y tercera.

PIEZA 1

Tabla 21: Medida 3D del contorno (pieza 1 ejecución 1 de 3)

Ejecución 1	Contorno	Distancia 3D		
	Desviación	-tol.	+tol.	Fuera tol.
Punto 1	0,007mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 2	0,111mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 3	0,231mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 4	0,312mm	-0,300mm	0,300mm	0,012mm
Punto 5	0,126mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 6	0,286mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 7	0,309mm	-0,300mm	0,300mm	0,009mm
Punto 8	0,115mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 9	0,108mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm

Tabla 22: Medida 3D centro taladros (pieza 1 ejecución 1 de 3)

Ejecución 1	Taladros	Distancia 3D				
Agujero B	Real	Nominal	Desviación	-tol.	+tol.	Fuera tol.
Central.x	0,000mm	0,000mm	0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Central.y	0,000mm	0,000mm	0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Central.z	0,000mm	0,000mm	0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Distancia 3D			0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Agujero C						
Central.x	96,010mm	95,994mm	0,016mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Central.y	0,000mm	0,000mm	0,000mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Central.z	-0,207mm	-0,207mm	0,000mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Distancia 3D			0,016mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Agujero 3						
Central.x	158,858mm	158,820mm	0,038mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Central.y	-23,969mm	-23,975mm	0,006mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Central.z	-0,453mm	-0,453mm	0,000mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Distancia 3D			0,038mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm

Tabla 23: Medida 3D del contorno (pieza 1 ejecución 2 de 3)

Ejecución 2	Contorno	Distancia 3D		
	Desviación	-tol.	+tol.	Fuera tol.
Punto 1	0,006mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 2	0,211mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 3	0,131mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 4	0,032mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 5	0,137mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 6	0,076mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 7	0,198mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 8	0,115mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 9	0,156mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm

Tabla 24: Medida 3D centro taladros (pieza 1 ejecución 2 de 3)

Ejecución 2	Taladros	Distancia 3D				
		Nominal	Desviación	-tol.	+tol.	Fuera tol.
Agujero B	Real					
Central.x	0,000mm	0,000mm	0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Central.y	0,000mm	0,000mm	0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Central.z	0,000mm	0,000mm	0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Distancia 3D			0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Agujero C						
Central.x	96,011mm	95,994mm	0,017mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Central.y	0,000mm	0,000mm	0,000mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Central.z	-0,207mm	-0,207mm	0,000mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Distancia 3D			0,016mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Agujero 3						
Central.x	158,860mm	158,820mm	0,040mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Central.y	-24,019mm	-23,975mm	0,044mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Central.z	-0,453mm	-0,453mm	0,000mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Distancia 3D			0,038mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm

Tabla 25: Medida 3D del contorno (pieza 1 ejecución 3 de 3)

Ejecución 3	Contorno	Distancia 3D		
	Desviación	-tol.	+tol.	Fuera tol.
Punto 1	0,003mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 2	0,311mm	-0,300mm	0,300mm	0,011mm
Punto 3	0,268mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 4	0,054mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 5	0,142mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 6	0,263mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 7	0,078mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 8	0,125mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 9	0,123mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm

Tabla 26: Medida 3D centro taladros (pieza 1 ejecución 3 de 3)

Ejecución 3	Taladros	Distancia 3D				
Agujero B	Real	Nominal	Desviación	-tol.	+tol.	Fuera tol.
Central.x	0,000mm	0,000mm	0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Central.y	0,000mm	0,000mm	0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Central.z	0,000mm	0,000mm	0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Distancia 3D			0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Agujero C						
Central.x	96,010mm	95,994mm	0,016mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Central.y	0,000mm	0,000mm	0,000mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Central.z	-0,207mm	-0,207mm	0,000mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Distancia 3D			0,016mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Agujero 3						
Central.x	158,858mm	158,820mm	0,038mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Central.y	-23,969mm	-23,975mm	0,006mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Central.z	-0,453mm	-0,453mm	0,000mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Distancia 3D			0,038mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm

PIEZA 2

Tabla 27: Medida 3D del contorno (pieza 2 ejecución 1 de 3)

Ejecución 1	Contorno	Distancia 3D		
	Desviación	-tol.	+tol.	Fuera tol.
Punto 1	0,005mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 2	0,110mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 3	0,151mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 4	0,112mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 5	0,126mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 6	0,286mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 7	0,240mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 8	0,115mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 9	0,180mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm

Tabla 28: Medida 3D centro taladros (pieza 2 ejecución 1 de 3)

Ejecución 1	Taladros	Distancia 3D				
Agujero B	Real	Nominal	Desviación	-tol.	+tol.	Fuera tol.
Central.x	0,000mm	0,000mm	0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Central.y	0,000mm	0,000mm	0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Central.z	0,000mm	0,000mm	0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Distancia 3D			0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Agujero C						
Central.x	96,012mm	95,994mm	0,018mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Central.y	0,000mm	0,000mm	0,000mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Central.z	-0,206mm	-0,207mm	0,001mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Distancia 3D			0,016mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Agujero 3						
Central.x	158,856mm	158,820mm	0,036mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Central.y	-23,971mm	-23,975mm	0,004mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Central.z	-0,453mm	-0,453mm	0,000mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Distancia 3D			0,038mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm

Tabla 29: Medida 3D del contorno (pieza 2 ejecución 2 de 3)

Ejecución 2	Contorno	Distancia 3D		
	Desviación	-tol.	+tol.	Fuera tol.
Punto 1	0,006mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 2	0,191mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 3	0,122mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 4	0,102mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 5	0,121mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 6	0,052mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 7	0,218mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 8	0,095mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 9	0,136mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm

Tabla 30: Medida 3D centro taladros (pieza 2 ejecución 2 de 3)

Ejecución 2	Taladros	Distancia 3D				
Agujero B	Real	Nominal	Desviación	-tol.	+tol.	Fuera tol.
Central.x	0,000mm	0,000mm	0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Central.y	0,000mm	0,000mm	0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Central.z	0,000mm	0,000mm	0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Distancia 3D			0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Agujero C						
Central.x	96,011mm	95,994mm	0,017mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Central.y	0,000mm	0,000mm	0,000mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Central.z	-0,206mm	-0,207mm	0,001mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Distancia 3D			0,016mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Agujero 3						
Central.x	158,850mm	158,820mm	0,030mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Central.y	-23,990mm	-23,975mm	0,015mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Central.z	-0,452mm	-0,453mm	0,001mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Distancia 3D			0,038mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm

Tabla 31: Medida 3D del contorno (pieza 2 ejecución 3 de 3)

Ejecución 3	Contorno	Distancia 3D		
	Desviación	-tol.	+tol.	Fuera tol.
Punto 1	0,010mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 2	0,088mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 3	0,201mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 4	0,096mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 5	0,213mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 6	0,133mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 7	0,087mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 8	0,125mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 9	0,234mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm

Tabla 32: Medida 3D centro taladros (pieza 2 ejecución 3 de 3)

Ejecución 3	Taladros	Distancia 3D				
Agujero B	Real	Nominal	Desviación	-tol.	+tol.	Fuera tol.
Central.x	0,000mm	0,000mm	0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Central.y	0,000mm	0,000mm	0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Central.z	0,000mm	0,000mm	0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Distancia 3D			0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Agujero C						
Central.x	96,012mm	95,994mm	0,018mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Central.y	0,000mm	0,000mm	0,000mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Central.z	-0,204mm	-0,207mm	0,003mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Distancia 3D			0,016mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Agujero 3						
Central.x	158,830mm	158,820mm	0,010mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Central.y	-23,970mm	-23,975mm	0,005mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Central.z	-0,453mm	-0,453mm	0,000mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Distancia 3D			0,038mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm

PIEZA 3

Tabla 33: Medida 3D del contorno (pieza 3 ejecución 1 de 3)

Ejecución 1	Contorno	Distancia 3D		
	Desviación	-tol.	+tol.	Fuera tol.
Punto 1	0,009mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 2	0,110mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 3	0,235mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 4	0,231mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 5	0,126mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 6	0,286mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 7	0,002mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 8	0,115mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 9	0,108mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm

Tabla 34: Medida 3D centro taladros (pieza 3 ejecución 1 de 3)

Ejecución 1	Taladros	Distancia 3D				
Agujero B	Real	Nominal	Desviación	-tol.	+tol.	Fuera tol.
Central.x	0,000mm	0,000mm	0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Central.y	0,000mm	0,000mm	0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Central.z	0,000mm	0,000mm	0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Distancia 3D			0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Agujero C						
Central.x	96,000mm	95,994mm	0,006mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Central.y	0,000mm	0,000mm	0,000mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Central.z	-0,214mm	-0,207mm	0,007mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Distancia 3D			0,016mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Agujero 3						
Central.x	158,822mm	158,820mm	0,002mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Central.y	-23,975mm	-23,975mm	0,000mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Central.z	-0,455mm	-0,453mm	0,002mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Distancia 3D			0,038mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm

Tabla 35: Medida 3D del contorno (pieza 3 ejecución 2 de 3)

Ejecución 2	Contorno	Distancia 3D		
	Desviación	-tol.	+tol.	Fuera tol.
Punto 1	0,004mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 2	0,211mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 3	0,131mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 4	0,032mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 5	0,237mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 6	0,076mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 7	0,199mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 8	0,115mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 9	0,165mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm

Tabla 36: Medida 3D centro taladros (pieza 3 ejecución 2 de 3)

Ejecución 2	Taladros	Distancia 3D				
Agujero B	Real	Nominal	Desviación	-tol.	+tol.	Fuera tol.
Central.x	0,000mm	0,000mm	0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Central.y	0,000mm	0,000mm	0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Central.z	0,000mm	0,000mm	0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Distancia 3D			0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Agujero C						
Central.x	96,011mm	95,994mm	0,017mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Central.y	0,000mm	0,000mm	0,000mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Central.z	-0,208mm	-0,207mm	0,001mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Distancia 3D			0,016mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Agujero 3						
Central.x	158,860mm	158,820mm	0,040mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Central.y	-23,980mm	-23,975mm	0,005mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Central.z	-0,453mm	-0,453mm	0,000mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Distancia 3D			0,038mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm

Tabla 37: Medida 3D del contorno (pieza 3 ejecución 3 de 3)

Ejecución 3	Contorno	Distancia 3D		
	Desviación	-tol.	+tol.	Fuera tol.
Punto 1	0,034mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 2	0,122mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 3	0,268mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 4	0,054mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 5	0,142mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 6	0,263mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 7	0,158mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 8	0,311mm	-0,300mm	0,300mm	0,011mm
Punto 9	0,123mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm

Tabla 38: Medida 3D centro taladros (pieza 3 ejecución 3 de 3)

Ejecución 3	Taladros	Distancia 3D				
Agujero B	Real	Nominal	Desviación	-tol.	+tol.	Fuera tol.
Central.x	0,000mm	0,000mm	0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Central.y	0,000mm	0,000mm	0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Central.z	0,000mm	0,000mm	0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Distancia 3D			0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Agujero C						
Central.x	96,010mm	95,994mm	0,016mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Central.y	0,000mm	0,000mm	0,000mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Central.z	-0,206mm	-0,207mm	0,001mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Distancia 3D			0,016mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Agujero 3						
Central.x	158,820mm	158,820mm	0,000mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Central.y	-23,969mm	-23,975mm	0,006mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Central.z	-0,450mm	-0,453mm	0,003mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Distancia 3D			0,038mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm

PIEZA 4

Tabla 39: Medida 3D del contorno (pieza 4 ejecución 1 de 3)

Ejecución 1	Contorno	Distancia 3D		
	Desviación	-tol.	+tol.	Fuera tol.
Punto 1	0,301mm	-0,300mm	0,300mm	0,001mm
Punto 2	0,011mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 3	0,231mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 4	0,098mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 5	0,126mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 6	0,116mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 7	0,006mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 8	0,115mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 9	0,008mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm

Tabla 40: Medida 3D centro taladros (pieza 4 ejecución 1 de 3)

Ejecución 1	Taladros	Distancia 3D				
Agujero B	Real	Nominal	Desviación	-tol.	+tol.	Fuera tol.
Central.x	0,000mm	0,000mm	0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Central.y	0,000mm	0,000mm	0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Central.z	0,000mm	0,000mm	0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Distancia 3D			0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Agujero C						
Central.x	95,994mm	95,994mm	0,000mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Central.y	0,000mm	0,000mm	0,000mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Central.z	-0,207mm	-0,207mm	0,000mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Distancia 3D			0,016mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Agujero 3						
Central.x	158,867mm	158,820mm	0,047mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Central.y	-23,969mm	-23,975mm	0,006mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Central.z	-0,454mm	-0,453mm	0,001mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Distancia 3D			0,038mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm

Tabla 41: Medida 3D del contorno (pieza 4 ejecución 2 de 3)

Ejecución 2	Contorno	Distancia 3D		
	Desviación	-tol.	+tol.	Fuera tol.
Punto 1	0,077mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 2	0,213mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 3	0,129mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 4	0,242mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 5	0,130mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 6	0,075mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 7	0,190mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 8	0,115mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 9	0,155mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm

Tabla 42: Medida 3D centro taladros (pieza 4 ejecución 2 de 3)

Ejecución 2	Taladros	Distancia 3D				
Agujero B	Real	Nominal	Desviación	-tol.	+tol.	Fuera tol.
Central.x	0,000mm	0,000mm	0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Central.y	0,000mm	0,000mm	0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Central.z	0,000mm	0,000mm	0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Distancia 3D			0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Agujero C						
Central.x	96,015mm	95,994mm	0,021mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Central.y	0,000mm	0,000mm	0,000mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Central.z	-0,207mm	-0,207mm	0,000mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Distancia 3D			0,016mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Agujero 3						
Central.x	158,860mm	158,820mm	0,040mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Central.y	-24,019mm	-23,975mm	0,044mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Central.z	-0,450mm	-0,453mm	0,003mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Distancia 3D			0,038mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm

Tabla 43: Medida 3D del contorno (pieza 4 ejecución 3 de 3)

Ejecución 3	Contorno	Distancia 3D		
	Desviación	-tol.	+tol.	Fuera tol.
Punto 1	0,103mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 2	0,168mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 3	0,168mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 4	0,024mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 5	0,152mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 6	0,260mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 7	0,058mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 8	0,025mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 9	0,103mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm

Tabla 44: Medida 3D centro taladros (pieza 4 ejecución 3 de 3)

Ejecución 3	Taladros	Distancia 3D				
Agujero B	Real	Nominal	Desviación	-tol.	+tol.	Fuera tol.
Central.x	0,000mm	0,000mm	0,000mm	-0,200mm	0,200mm	0,000mm
Central.y	0,000mm	0,000mm	0,000mm	-0,200mm	0,200mm	0,000mm
Central.z	0,000mm	0,000mm	0,000mm	-0,200mm	0,200mm	0,000mm
Distancia 3D			0,000mm	-0,200mm	0,200mm	0,000mm
Agujero C						
Central.x	95,910mm	95,994mm	0,084mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Central.y	0,000mm	0,000mm	0,000mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Central.z	-0,202mm	-0,207mm	0,005mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Distancia 3D			0,016mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Agujero 3						
Central.x	158,820mm	158,820mm	0,000mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Central.y	-23,969mm	-23,975mm	0,006mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Central.z	-0,453mm	-0,453mm	0,000mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Distancia 3D			0,038mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm

PIEZA 5

Tabla 45: Medida 3D del contorno (pieza 5 ejecución 1 de 3)

Ejecución 1	Contorno	Distancia 3D		
	Desviación	-tol.	+tol.	Fuera tol.
Punto 1	0,022mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 2	0,167mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 3	0,073mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 4	0,009mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 5	0,104mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 6	0,201mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 7	0,032mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 8	0,199mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 9	0,008mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm

Tabla 46: Medida 3D centro taladros (pieza 5 ejecución 1 de 3)

Ejecución 1	Taladros	Distancia 3D				
Agujero B	Real	Nominal	Desviación	-tol.	+tol.	Fuera tol.
Central.x	0,000mm	0,000mm	0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Central.y	0,000mm	0,000mm	0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Central.z	0,000mm	0,000mm	0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Distancia 3D			0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Agujero C						
Central.x	95,990mm	95,994mm	0,004mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Central.y	0,000mm	0,000mm	0,000mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Central.z	-0,207mm	-0,207mm	0,000mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Distancia 3D			0,016mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Agujero 3						
Central.x	158,828mm	158,820mm	0,008mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Central.y	-23,971mm	-23,975mm	0,004mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Central.z	-0,453mm	-0,453mm	0,000mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Distancia 3D			0,038mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm

Tabla 47: Medida 3D del contorno (pieza 5 ejecución 2 de 3)

Ejecución 2	Contorno	Distancia 3D		
	Desviación	-tol.	+tol.	Fuera tol.
Punto 1	0,026mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 2	0,212mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 3	0,031mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 4	0,033mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 5	0,037mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 6	0,101mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 7	0,105mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 8	0,113mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 9	0,136mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm

Tabla 48: Medida 3D centro taladros (pieza 5 ejecución 2 de 3)

Ejecución 2	Taladros	Distancia 3D				
Agujero B	Real	Nominal	Desviación	-tol.	+tol.	Fuera tol.
Central.x	0,000mm	0,000mm	0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Central.y	0,000mm	0,000mm	0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Central.z	0,000mm	0,000mm	0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Distancia 3D			0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Agujero C						
Central.x	96,010mm	95,994mm	0,016mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Central.y	0,000mm	0,000mm	0,000mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Central.z	-0,205mm	-0,207mm	0,002mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Distancia 3D			0,016mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Agujero 3						
Central.x	158,842mm	158,820mm	0,022mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Central.y	-23,970mm	-23,975mm	0,005mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Central.z	-0,451mm	-0,453mm	0,002mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Distancia 3D			0,038mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm

Tabla 49: Medida 3D del contorno (pieza 5 ejecución 3 de 3)

Ejecución 3	Contorno	Distancia 3D		
	Desviación	-tol.	+tol.	Fuera tol.
Punto 1	0,012mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 2	0,009mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 3	0,103mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 4	0,050mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 5	0,028mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 6	0,261mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 7	0,077mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 8	0,125mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 9	0,132mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm

Tabla 50: Medida 3D centro taladros (pieza 5 ejecución 3 de 3)

Ejecución 3	Taladros	Distancia 3D				
Agujero B	Real	Nominal	Desviación	-tol.	+tol.	Fuera tol.
Central.x	0,000mm	0,000mm	0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Central.y	0,000mm	0,000mm	0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Central.z	0,000mm	0,000mm	0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Distancia 3D			0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Agujero C						
Central.x	95,999mm	95,994mm	0,005mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Central.y	0,000mm	0,000mm	0,000mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Central.z	-0,207mm	-0,207mm	0,000mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Distancia 3D			0,016mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Agujero 3						
Central.x	158,821mm	158,820mm	0,001mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Central.y	-23,970mm	-23,975mm	0,005mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Central.z	-0,453mm	-0,453mm	0,000mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Distancia 3D			0,038mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm

PIEZA 6

Tabla 51: Medida 3D del contorno (pieza 6 ejecución 1 de 3)

Ejecución 1	Contorno	Distancia 3D		
	Desviación	-tol.	+tol.	Fuera tol.
Punto 1	0,003mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 2	0,011mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 3	0,028mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 4	0,099mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 5	0,101mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 6	0,161mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 7	0,022mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 8	0,140mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 9	0,102mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm

Tabla 52: Medida 3D centro taladros (pieza 6 ejecución 1 de 3)

Ejecución 1	Taladros	Distancia 3D				
Agujero B	Real	Nominal	Desviación	-tol.	+tol.	Fuera tol.
Central.x	0,000mm	0,000mm	0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Central.y	0,000mm	0,000mm	0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Central.z	0,000mm	0,000mm	0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Distancia 3D			0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Agujero C						
Central.x	95,994mm	95,994mm	0,000mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Central.y	0,000mm	0,000mm	0,000mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Central.z	-0,207mm	-0,207mm	0,000mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Distancia 3D			0,016mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Agujero 3						
Central.x	158,835mm	158,820mm	0,015mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Central.y	-23,974mm	-23,975mm	0,001mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Central.z	-0,453mm	-0,453mm	0,000mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Distancia 3D			0,038mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm

Tabla 53: Medida 3D del contorno (pieza 6 ejecución 2 de 3)

Ejecución 2	Contorno	Distancia 3D		
	Desviación	-tol.	+tol.	Fuera tol.
Punto 1	0,096mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 2	0,111mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 3	0,031mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 4	0,031mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 5	0,037mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 6	0,077mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 7	0,088mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 8	0,101mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 9	0,066mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm

Tabla 54: Medida 3D centro taladros (pieza 6 ejecución 2 de 3)

Ejecución 2	Taladros	Distancia 3D				
Agujero B	Real	Nominal	Desviación	-tol.	+tol.	Fuera tol.
Central.x	0,000mm	0,000mm	0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Central.y	0,000mm	0,000mm	0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Central.z	0,000mm	0,000mm	0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Distancia 3D			0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Agujero C						
Central.x	96,000mm	95,994mm	0,006mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Central.y	0,000mm	0,000mm	0,000mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Central.z	-0,207mm	-0,207mm	0,000mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Distancia 3D			0,016mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Agujero 3						
Central.x	158,815mm	158,820mm	0,005mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Central.y	-23,974mm	-23,975mm	0,001mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Central.z	-0,451mm	-0,453mm	0,001mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Distancia 3D			0,038mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm

Tabla 55: Medida 3D del contorno (pieza 6 ejecución 3 de 3)

Ejecución 3	Contorno	Distancia 3D		
	Desviación	-tol.	+tol.	Fuera tol.
Punto 1	0,018mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 2	0,030mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 3	0,168mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 4	0,051mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 5	0,002mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 6	0,023mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 7	0,078mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 8	0,005mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 9	0,100mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm

Tabla 56: Medida 3D centro taladros (pieza 6 ejecución 3 de 3)

Ejecución 3	Taladros	Distancia 3D				
Agujero B	Real	Nominal	Desviación	-tol.	+tol.	Fuera tol.
Central.x	0,000mm	0,000mm	0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Central.y	0,000mm	0,000mm	0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Central.z	0,000mm	0,000mm	0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Distancia 3D			0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Agujero C						
Central.x	95,999mm	95,994mm	0,005mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Central.y	0,000mm	0,000mm	0,000mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Central.z	-0,207mm	-0,207mm	0,000mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Distancia 3D			0,016mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Agujero 3						
Central.x	158,830mm	158,820mm	0,010mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Central.y	-23,969mm	-23,975mm	0,006mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Central.z	-0,449mm	-0,453mm	0,004mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Distancia 3D			0,038mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm

PIEZA 7

Tabla 57: Medida 3D del contorno (pieza 7 ejecución 1 de 3)

Ejecución 1	Contorno	Distancia 3D		
	Desviación	-tol.	+tol.	Fuera tol.
Punto 1	0,009mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 2	0,100mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 3	0,261mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 4	0,290mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 5	0,226mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 6	0,286mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 7	0,100mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 8	0,115mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 9	0,307mm	-0,300mm	0,300mm	0,007mm

Tabla 58: Medida 3D centro taladros (pieza 7 ejecución 1 de 3)

Ejecución 1	Taladros	Distancia 3D				
Agujero B	Real	Nominal	Desviación	-tol.	+tol.	Fuera tol.
Central.x	0,000mm	0,000mm	0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Central.y	0,000mm	0,000mm	0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Central.z	0,000mm	0,000mm	0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Distancia 3D			0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Agujero C						
Central.x	96,011mm	95,994mm	0,017mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Central.y	0,000mm	0,000mm	0,000mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Central.z	-0,210mm	-0,207mm	0,003mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Distancia 3D			0,016mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Agujero 3						
Central.x	158,859mm	158,820mm	0,039mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Central.y	-23,969mm	-23,975mm	0,006mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Central.z	-0,455mm	-0,453mm	0,002mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Distancia 3D			0,038mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm

Tabla 59: Medida 3D del contorno (pieza 7 ejecución 2 de 3)

Ejecución 2	Contorno	Distancia 3D		
	Desviación	-tol.	+tol.	Fuera tol.
Punto 1	0,096mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 2	0,011mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 3	0,139mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 4	0,039mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 5	0,139mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 6	0,074mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 7	0,199mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 8	0,110mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 9	0,154mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm

Tabla 60: Medida 3D centro taladros (pieza 7 ejecución 2 de 3)

Ejecución 2	Taladros	Distancia 3D				
Agujero B	Real	Nominal	Desviación	-tol.	+tol.	Fuera tol.
Central.x	0,000mm	0,000mm	0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Central.y	0,000mm	0,000mm	0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Central.z	0,000mm	0,000mm	0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Distancia 3D			0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Agujero C						
Central.x	96,010mm	95,994mm	0,016mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Central.y	0,000mm	0,000mm	0,000mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Central.z	-0,210mm	-0,207mm	0,003mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Distancia 3D			0,016mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Agujero 3						
Central.x	158,825mm	158,820mm	0,005mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Central.y	-23,970mm	-23,975mm	0,005mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Central.z	-0,440mm	-0,453mm	0,013mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Distancia 3D			0,038mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm

Tabla 61: Medida 3D del contorno (pieza 7 ejecución 3 de 3)

Ejecución 3	Contorno	Distancia 3D		
	Desviación	-tol.	+tol.	Fuera tol.
Punto 1	0,093mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 2	0,000mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 3	0,068mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 4	0,124mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 5	0,149mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 6	0,063mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 7	0,078mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 8	0,025mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 9	0,120mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm

Tabla 62: Medida 3D centro taladros (pieza 7 ejecución 3 de 3)

Ejecución 3	Taladros	Distancia 3D				
Agujero B	Real	Nominal	Desviación	-tol.	+tol.	Fuera tol.
Central.x	0,000mm	0,000mm	0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Central.y	0,000mm	0,000mm	0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Central.z	0,000mm	0,000mm	0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Distancia 3D			0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Agujero C						
Central.x	96,010mm	95,994mm	0,016mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Central.y	0,000mm	0,000mm	0,000mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Central.z	-0,205mm	-0,207mm	0,0020mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Distancia 3D			0,016mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Agujero 3						
Central.x	158,821mm	158,820mm	0,001mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Central.y	-23,969mm	-23,975mm	0,006mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Central.z	-0,443mm	-0,453mm	0,010mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Distancia 3D			0,038mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm

PIEZA 8

Tabla 63: Medida 3D del contorno (pieza 8 ejecución 1 de 3)

Ejecución 1	Contorno	Distancia 3D		
	Desviación	-tol.	+tol.	Fuera tol.
Punto 1	0,017mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 2	0,110mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 3	0,131mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 4	0,018mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 5	0,120mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 6	0,116mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 7	0,009mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 8	0,110mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 9	0,199mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm

Tabla 64: Medida 3D centro taladros (pieza 8 ejecución 1 de 3)

Ejecución 1	Taladros	Distancia 3D				
Agujero B	Real	Nominal	Desviación	-tol.	+tol.	Fuera tol.
Central.x	0,000mm	0,000mm	0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Central.y	0,000mm	0,000mm	0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Central.z	0,000mm	0,000mm	0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Distancia 3D			0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Agujero C						
Central.x	96,010mm	95,994mm	0,016mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Central.y	0,000mm	0,000mm	0,000mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Central.z	-0,227mm	-0,207mm	0,020mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Distancia 3D			0,016mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Agujero 3						
Central.x	158,850mm	158,820mm	0,030mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Central.y	-23,970mm	-23,975mm	0,005mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Central.z	-0,453mm	-0,453mm	0,000mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Distancia 3D			0,038mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm

Tabla 65: Medida 3D del contorno (pieza 8 ejecución 2 de 3)

Ejecución 2	Contorno	Distancia 3D		
	Desviación	-tol.	+tol.	Fuera tol.
Punto 1	0,015mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 2	0,111mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 3	0,132mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 4	0,132mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 5	0,135mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 6	0,096mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 7	0,098mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 8	0,015mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 9	0,056mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm

Tabla 66: Medida 3D centro taladros (pieza 8 ejecución 2 de 3)

Ejecución 2	Taladros	Distancia 3D				
Agujero B	Real	Nominal	Desviación	-tol.	+tol.	Fuera tol.
Central.x	0,000mm	0,000mm	0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Central.y	0,000mm	0,000mm	0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Central.z	0,000mm	0,000mm	0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Distancia 3D			0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Agujero C						
Central.x	95,991mm	95,994mm	0,003mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Central.y	0,000mm	0,000mm	0,000mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Central.z	-0,207mm	-0,207mm	0,000mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Distancia 3D			0,016mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Agujero 3						
Central.x	158,850mm	158,820mm	0,030mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Central.y	-24,019mm	-23,975mm	0,044mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Central.z	-0,443mm	-0,453mm	0,010mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Distancia 3D			0,038mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm

Tabla 67: Medida 3D del contorno (pieza 8 ejecución 3 de 3)

Ejecución 3	Contorno	Distancia 3D		
	Desviación	-tol.	+tol.	Fuera tol.
Punto 1	0,001mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 2	0,001mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 3	0,068mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 4	0,054mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 5	0,042mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 6	0,269mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 7	0,278mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 8	0,225mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 9	0,223mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm

Tabla 68: Medida 3D centro taladros (pieza 8 ejecución 3 de 3)

Ejecución 3	Taladros	Distancia 3D				
Agujero B	Real	Nominal	Desviación	-tol.	+tol.	Fuera tol.
Central.x	0,000mm	0,000mm	0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Central.y	0,000mm	0,000mm	0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Central.z	0,000mm	0,000mm	0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Distancia 3D			0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Agujero C						
Central.x	96,009mm	95,994mm	0,015mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Central.y	0,000mm	0,000mm	0,000mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Central.z	-0,201mm	-0,207mm	0,006mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Distancia 3D			0,016mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Agujero 3						
Central.x	158,858mm	158,820mm	0,038mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Central.y	-23,969mm	-23,975mm	0,006mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Central.z	-0,459mm	-0,453mm	0,006mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Distancia 3D			0,038mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm

PIEZA 9

Tabla 69: Medida 3D del contorno (pieza 9 ejecución 1 de 3)

Ejecución 1	Contorno	Distancia 3D		
	Desviación	-tol.	+tol.	Fuera tol.
Punto 1	0,033mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 2	0,113mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 3	0,231mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 4	0,033mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 5	0,123mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 6	0,186mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 7	0,133mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 8	0,115mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 9	0,198mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm

Tabla 70: Medida 3D centro taladros (pieza 9 ejecución 1 de 3)

Ejecución 1	Taladros	Distancia 3D				
Agujero B	Real	Nominal	Desviación	-tol.	+tol.	Fuera tol.
Central.x	0,000mm	0,000mm	0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Central.y	0,000mm	0,000mm	0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Central.z	0,000mm	0,000mm	0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Distancia 3D			0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Agujero C						
Central.x	96,000mm	95,994mm	0,006mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Central.y	0,000mm	0,000mm	0,000mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Central.z	-0,206mm	-0,207mm	0,001mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Distancia 3D			0,016mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Agujero 3						
Central.x	158,858mm	158,820mm	0,038mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Central.y	-23,969mm	-23,975mm	0,006mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Central.z	-0,459mm	-0,453mm	0,006mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Distancia 3D			0,038mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm

Tabla 71: Medida 3D del contorno (pieza 9 ejecución 2 de 3)

Ejecución 2	Contorno	Distancia 3D		
	Desviación	-tol.	+tol.	Fuera tol.
Punto 1	0,293mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 2	0,219mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 3	0,231mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 4	0,132mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 5	0,137mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 6	0,079mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 7	0,199mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 8	0,115mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 9	0,166mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm

Tabla 72: Medida 3D centro taladros (pieza 8 ejecución 2 de 3)

Ejecución 2	Taladros	Distancia 3D				
		Nominal	Desviación	-tol.	+tol.	Fuera tol.
Agujero B	Real					
Central.x	0,000mm	0,000mm	0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Central.y	0,000mm	0,000mm	0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Central.z	0,000mm	0,000mm	0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Distancia 3D			0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Agujero C						
Central.x	95,999mm	95,994mm	0,005mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Central.y	0,000mm	0,000mm	0,000mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Central.z	-0,207mm	-0,207mm	0,000mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Distancia 3D			0,016mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Agujero 3						
Central.x	158,822mm	158,820mm	0,002mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Central.y	-23,977mm	-23,975mm	0,002mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Central.z	-0,453mm	-0,453mm	0,000mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Distancia 3D			0,038mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm

Tabla 73: Medida 3D del contorno (pieza 9 ejecución 3 de 3)

Ejecución 3	Contorno	Distancia 3D		
	Desviación	-tol.	+tol.	Fuera tol.
Punto 1	0,003mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 2	0,000mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 3	0,008mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 4	0,051mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 5	0,042mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 6	0,103mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 7	0,078mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 8	0,125mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Punto 9	0,103mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm

Tabla 74: Medida 3D centro taladros (pieza 8 ejecución 3 de 3)

Ejecución 3	Taladros	Distancia 3D				
Agujero B	Real	Nominal	Desviación	-tol.	+tol.	Fuera tol.
Central.x	0,000mm	0,000mm	0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Central.y	0,000mm	0,000mm	0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Central.z	0,000mm	0,000mm	0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Distancia 3D			0,000mm	0.00mm	0.00mm	0,000mm
Agujero C						
Central.x	96,010mm	95,994mm	0,016mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Central.y	0,000mm	0,000mm	0,000mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Central.z	-0,200mm	-0,207mm	0,0007m	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Distancia 3D			0,016mm	-0,100mm	0,100mm	0,000mm
Agujero 3						
Central.x	158,858mm	158,820mm	0,038mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Central.y	-23,975mm	-23,975mm	0,000mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Central.z	-0,453mm	-0,453mm	0,000mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm
Distancia 3D			0,038mm	-0,300mm	0,300mm	0,000mm

GLOSARIO DE SIGLAS:

CNC: “Control Numeric Cut” o corte por control numérico

CAD: “Computer Aided Design” o diseño asistido por ordenador

7. Bibliografía y referencias

Airbus, "AIP-03-02-19 Instrucción de procesos de Airbus, "Fabricación de piezas
1] monolíticas con materiales termoestables preimpregnados".

J. J. Alonso Pérez y E. Velasco Chillón, Mecanizado por arranque de viruta en la
2] industria aeroespacial, Madrid: EUITA.

Department of Defence , MIL-HDBK-17(Composite Materials Handbook), 2002.
3]

J. Sánchez, «Materiales compuestos en la industria aeronáutica (Airbus)».
4]